جيمس كليرك ماكسويل

والفيزياء الحديثة

معادلات ماكسويل

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

N

S

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

الضوء والكهرومغناطيسية

J. Clerk Maxwell



إعداد وتأليف

أ.م.د يحيي حمدي محمد إبراهيم البشار

جيمس كليرك ماكسويل

والفيزياء الحديثة

إعداد وتأليف

أ.م.د يحيي حمدي محمد إبراهيم البشار

عضو اللجنة الوطنية للفيزياء بأكاديمية البحث العلمي

خبير تكنولوجيا الليزر من نقابة المهن العلمية بالقاهرة

عضوسابق بمجلس شعبة الطبيعة والفلك لمجلس نقابة المهن العلمية بالقاهرة بجمهورية مصر العربية

2026



الكتاب : **جيمس كليرك ماكسويل والفيزياء الحديثة**

إعداد وتأليف : **أ.م.د. يحيي حمدي محمد إبراهيم البشار**

الطبعة الأولى : **مايو 2026**

لوحة الغلاف : (تصميم الربيع)

الإخراج والتنسيق الداخلي:

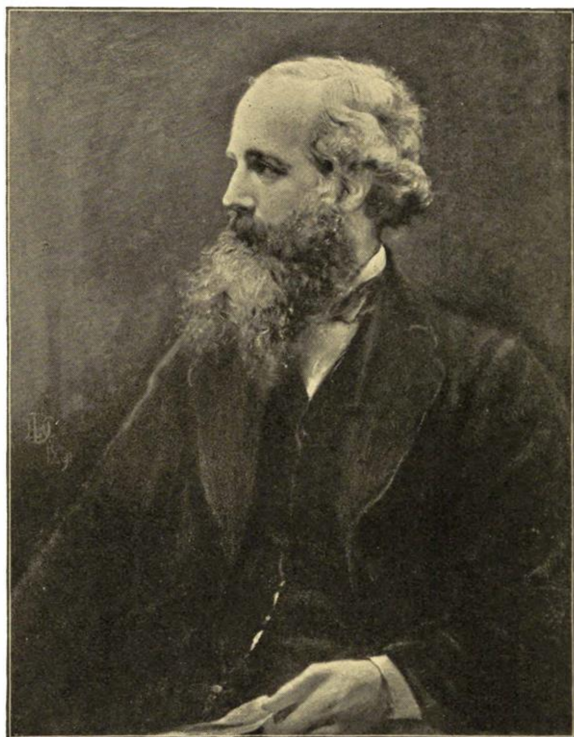
الربيع للصحافة والإعلام

13 شارع القومية ـ الزقازيق ـ ت مكتب 0552379677 موبايل 01064063063

(**للتواصل مع المؤلف: 01001141053**)

رقم الإيداع **2026/ 15624**

الترقيم الدولي **978/977- 95 - 7552 -0**



J. Clerk Maxwell

ج. كليرك ماكسويل

المقدمة

إن مهمة تقديم بعض الشرح لأعمال ماكسويل — وبيان إسهامه في تقدم العلوم الفيزيائية خلال النصف الأخير من هذا القرن التاسع عشر — لم تكن عملًا يسيرًا. فالمشكلات التي تناولها بالبحث على قدر كبير من الضخامة والتعقيد، حتى إن محاولة شرحها وبيان أهميتها بطريقة مُرضية من غير الاستعانة بالرموز الرياضية تكاد تكون محكومة بالفشل منذ البداية. ومع ذلك فقد بُذلت المحاولة، إيمانًا بأن هناك كثيرين، مع أنهم لا يستطيعون متابعة التحليل الرياضي في أعمال ماكسويل، فإن لديهم من المعرفة العامة بالأفكار والمبادئ الفيزيائية ما يكفي لجعل عرض حياة ماكسويل وتطور الحقائق التي اكتشفها موضوعًا يثير اهتمامًا واعيًا.

لقد كُتبت سيرة ماكسويل عام 1882 بقلم اثنين من أقرب الناس إليه: الأستاذ لويس كامبل والدكتور غارنت. وكثير من التفاصيل البيوغرافية الخاصة بالجزء المبكر من هذا الكتاب مأخوذ من عملهما. وإنني لأدين لهما ولناشريهما، السادة ماكميلان، بالشكر على الإذن باستخدام أي من الرسائل التي ظهرت في سيرتهما. وأرجو أن يكون عرضي الموجز كافيًا ليشجع الكثيرين على قراءة كتاب الأستاذ كامبل *الحياة والرسائل*، بقصد الاطلاع على مزيد من الأفكار الداخلية لرجل ترك أثرًا عميقًا في كل ما أنجزه، وكان محبوبًا بصدق من كل من عرفه.

الفصل الأول

الحياة المبكرة

"إن من زاد على الإرث الذي تركه نيوتن، ورسّخ عمل فاراداي، ودفع عقول كامبريدج إلى مسار جديد من البحث الحقيقي، قد استحق بجدارة أن يكون له موضع في ذاكرة البشر." بهذه الكلمات بدأ الأستاذ لويس كامبل والسيد غارنت عام 1882 كتابهما عن حياة جيمس كليرك ماكسويل. والسنوات التي مرّت منذ ذلك التاريخ كلها عملت على تعزيز الاعتقاد بعظمة أعمال ماكسويل وبخصوبة عبقريته، التي ألهمت جهود أولئك الذين، ليس في كامبريدج فحسب بل في أنحاء العالم كافة، ساعدوا في إنماء البذور التي زرعها. إن هدفي في الصفحات التالية أن أقدّم عرضًا موجزًا لحياته ومؤلفاته، في صورة أرجو أن تُمكّن الكثيرين من إدراك ما تدين به العلوم الفيزيائية لرجل كان بالنسبة لي صديقًا عطوفًا وأستاذًا مُهابًا.

إن عائلة "كليرك" في بينيكويك، التي انحدر منها كليرك ماكسويل، كانت أسرة متميزة. السير جون كليرك، الجد الأكبر لماكسويل، كان بارونًا في محكمة الحسابات في اسكتلندا منذ 1707 حتى 1755؛ وكان أيضًا أحد مفوضي الاتحاد، كما كان من عدة وجوه عالمًا بارعًا. أما ابنه الثاني، جورج، فقد تزوّج من ابنة عمه الأولى، دوروثيا ماكسويل، وريثة عقار "ميدلباي" في دمفريشر، واتخذ اسم ماكسويل. وعندما توفي شقيقه الأكبر جيمس عام 1782، آل إلى جورج كليرك

ماكسويل لقب البارونية وممتلكات بينيكويك. غير أنّه قبل ذلك الوقت كان قد تورّط في مضاربات التعدين والصناعة، فبيعت معظم أملاك "ميدلباي" لسداد ديونه.

وقد انتقلت ممتلكات السير جورج كليرك ماكسويل في عام 1798 إلى حفيديه الاثنين، السير جورج كليرك والسيد جون كليرك ماكسويل. وكان قد تقرر أن يأخذ الأصغر بينهما ما تبقى من ممتلكات "ميدلباي" وأن يقترن معها باسم ماكسويل. أمّا السير جورج كليرك فقد كان نائبًا عن منطقة "ميدلوثيان" وتولّى منصبًا في حكومة السير روبرت بيل. وكان جون كليرك ماكسويل والد جيمس كليرك ماكسويل، موضوع هذه السيرة.

عاش جون كليرك ماكسويل مع والدته الأرملة في إدنبرة حتى وفاتها عام 1824. وكان محاميًا، يقوم من وقت لآخر ببعض الأعمال في المحاكم. وفي الوقت نفسه ظل مهتمًا بالمساعي العلمية، وخصوصًا العملية منها. ويخبرنا الأستاذ كامبل عن محاولة له لتصميم منفاخ يوفّر تيارًا مستمرًا من الهواء. وفي عام 1831 نشر في "المجلة الطبية والفلسفية لإدنبرة" مقالة بعنوان "مخطط لدمج الآلات مع مطبعة يدوية."

وفي عام 1826 تزوج جون كليرك ماكسويل من الآنسة فرانسيس كاي، من "نورث تشارلتون" في نورثمبرلاند. وقضى الزوجان بضع سنواتهما الأولى في إدنبرة. وكانت أملاك "ميدلباي" قد تقلّصت كثيرًا، ولم يكن فيها بيت يمكن للمالك أن يعيش فيه. لكن بعد زواجه بوقت قصير اشترى جون كليرك ماكسويل العقار المجاور "غلينلير" وبنى

فيه قصرًا له ولزوجته. وقد أشرف بنفسه على أعمال البناء، وكانت الخطط التنفيذية لبعض الإضافات التي أجريت عام 1843 من عمل يده. كما أُنشئت حديقة وغُرست، وتحوّل المكان الموحش المليء بالصخور إلى منزل مريح. وبعد استقراره في "غلينلير" احتفظ السيد ماكسويل بالبيت في إدنبرة، وهناك، في 13 يونيو 1831، وُلد ابنه الوحيد جيمس كليرك ماكسويل. أما ابنته التي وُلدت قبله فقد توفيت في طفولتها. ومع ذلك، كان "غلينلير" هو منزل والديه، ومعظم ذكريات طفولته ارتبطت به. لقد كرّس والده نفسه لأملاكه ولتعليم ابنه، وكان يشارك من حين إلى آخر في الأعمال المحلية التي تقع على عاتقه. في عام 1830 كانت "غلينلير" في منطقة شبه نائية؛ إذ كانت الرحلة من إدنبرة تستغرق يومين. "فالسيارات بمعناها الحديث لم تكن معروفة تقريبًا في وادي "أور"، وكان نوع من العربات المزدوجة ذات غطاء هو أقصى ما يشبه عربة سفر، أما وسيلة التنقل الأكثر شيوعًا فكانت عربة خشنة تُعرف في حديث العائلة باسم "هورلي"."

كتبت السيدة ماكسويل3، عندما كان الصبي في نحو الثالثة من عمره، رسالة إلى أختها الآنسة جين كاي تقول فيها:

"إنه طفل سعيد جدًا، وقد تحسّن كثيرًا منذ اعتدل الطقس. إنه مشغول بالأبواب والأقفال والمفاتيح، وعبارته الدائمة: (أرني كيف تعمل). كما أنه يحقق في مجرى الجداول والأسلاك الخفية للأجراس — كيف يصل الماء من البركة عبر الجدار وقنطرة صغيرة ثم ينحدر في مصرف إلى نهر "أور"، ثم يمرّ بالحداد وينتهي إلى البحر حيث تبحر سفن ماغي. أما الأجراس فلن تصدأ؛ فهو يقف حارسًا في المطبخ، بينما تركض "ماغ" في أنحاء البيت لتقرعها كلها بالتناوب، أو يقرعها

هو ويرسل "بِسّي" لترى وتصيح كي تخبره؛ وهو يجرّ أباه ليريَه الثقوب التي تمرّ منها الأسلاك".

لقد كان اكتشاف "كيف تعمل الأشياء" غايته منذ وقت مبكر. وتخبرنا ابنة عمه، السيدة بلاكبيرن، أنه طوال طفولته كان سؤاله المتكرر هو: "ما وظيفة هذا؟ ماذا يفعل؟" وإذا كان الجواب غامضًا أو غير مقنع، أضاف: "ولكن ما الغرض الخاص لهذا الشيء؟"

ويقدّم لنا الأستاذ كامبل وصفًا ممتعًا لتلك السنوات الأولى مصحوبًا بعدد من الرسوم التي تصوّر مشاهد من حياته. ففي إحداها يظهر ماكسويل منهمكًا في مراقبة العازف في رقصة ريفية، وفي أخرى يعلّم كلبه بعض الحيل، وفي ثالثة يساعد صبيًا أصغر منه في بناء قلعة. ومع ابنة عمه، الآنسة ويدربرن، اخترع عددًا من الرسوم للعبة معروفة باسم "القرص السحري"، والتي تطورت فيما بعد إلى "الزويتروب" أو "عجلة الحياة"، حيث تُنتج بوساطة حيلة مبتكرة من المرايا إيحاء بالحركة المستمرة.

واستمرت هذه الحياة السعيدة حتى وفاة والدته في ديسمبر 1839؛ إذ توفيت في الثامنة والأربعين من عمرها بمرض مؤلم هو نفسه الذي أودى لاحقًا بحياة ابنها. وعندما أُبلغ جيمس، وكان حينها في الثامنة من عمره، بأنها الآن في السماء، قال: "آه، أنا سعيد جدًا! الآن لن تشعر بأي ألم بعد".

وبعد ذلك تولّت عمته، الآنسة جين كاي، دور الأم. وكان لا بد من مواجهة مسألة تعليمه، لكن المحاولات الأولى لم تنجح. فقد جرى التعاقد مع معلّم أثناء مرض السيدة ماكسويل الأخير، ويبدو أنه حاول

أن يُكره الصبي على التعلم، لكن هذه الطريقة فشلت، وفي عام 1841، وكان قد بلغ العاشرة، بدأ دراسته في "أكاديمية إدنبرة."

لم تخلُ الحياة المدرسية في البداية من المشقة. ففي أول يوم له بالمدرسة، بملابسه المصنوعة من صوف "غالاوي" وحذائه عريض الأصابع ذو الأبازيم، لم يستطع زملاؤه أن يتقبلوا مظهره. فسألوه: "من صنع هذا الحذاء؟"4 وكان جوابه الذي تلقوه:

"هل تعلم أنه كان رجلًا،
وكان يعيش في بيت،
وكان في ذلك البيت فأر".

عاد في ذلك العصر إلى شارع هيريوت رو، كما يقول البروفيسور كامبل، "ومعطفه ممزق ويفتقد ذيله، وياقته الأنيقة مشعثة وممزقة ـــ وهو نفسه في غاية التسلية بما جرى، دون أن يُظهر أدنى علامة على الانزعاج".

كان المنزل رقم 31 في شارع هيريوت رو بيت عمته الأرملة، السيدة ويدربرن، شقيقة السيد ماكسويل؛ وهذا البيت، مع فترات متقطعة قضاها عند الآنسة كاي، كان مسكنه خلال الثمانية أو التسعة أعوام التالية. أما السيد ماكسويل نفسه، فقد قضى معظم هذه الفترة في إدنبرة، حيث كان يعيش مع شقيقته أغلب الشتاء، ثم يعود إلى غلينلير في الربيع والصيف.

وأكثر ما نعرفه عن حياة كليرك ماكسويل في هذه الفترة وصلنا من الرسائل المتبادلة بينه وبين والده. وهي تكشف عن تلك العلاقة الوثيقة المفعمة بالود بينهما، وعن رغبة الفتى الشديدة في تسلية والده

وإرضائه في وحدة غلينلير الكئيبة، وعن قلق الوالد على رفاهية ابنه وتقدمه.

وكان البروفيسور كامبل زميله في المدرسة، وقد دوّن أحداث تلك السنوات التي عاشها معه، مما يقدّم لنا صورة حيّة عن شخصية ماكسويل. فيكتب5 قائلًا:
"لقد تعرف على سويفت ودرايدن، وبعد حين على هوبز، وعلى (هديبراس) لباتلر. ثم إذا كان والده في إدنبرة، كانا يتجولان معًا، خاصة في عطلة السبت نصف النهارية، فيزوران حصن ليث، أو يستكشفان أعمال إنشاء سكة حديد غرانتون، أو طبقات صخور سالزبري — وكان دائمًا يتعلم شيئًا جديدًا، ويكتسب أفكارًا تغذّي مخيلته. وفي يوم سبت، 12 فبراير 1842، حظي بمتعة خاصة، إذ اصطحبه والده (لرؤية آلات كهرومغناطيسية)".

ويواصل حديثه عن الحياة المدرسية:
"لكنه في المدرسة أيضًا تقدّم تدريجيًا. وسرعان ما أدرك أن اللاتينية جديرة بأن تُتعلّم، وأن كتاب (المختارات) في اليونانية أثار اهتمامه عندما وصلنا إليه. وكان هناك موضوعان احتل فيهما الصدارة بمجرد أن أتيحت له فرصة عادلة؛ وهما سِيَر الكتاب المقدس واللغة الإنجليزية. أما في الحساب كما في اللاتينية فقد كانت قلة سرعته نسبيًا تعوقه.

وعلى العموم حقق قدرًا من النجاح كفيلًا بأن يكسبه احترامًا معينًا؛ ومهما بدا غريبًا أحيانًا لرفاقه، فقد كان يتمتع بثلاث صفات لم يكن بوسعهم إغفالها: قوة بدنية مرنة، شجاعة لا تتزعزع، وطيبة عميقة.

ويتذكر البروفيسور جيمس مويرهيد أنه كان (فتى ودودًا، وإن لم يندمج تمامًا مع البقية). أما زميل دراسة آخر، القس و. ماكفارلين من لينزي، فقد دوّن انطباعه على النحو التالي: (كان كليرك ماكسويل حين دخل الأكاديمية ريفيًا بعض الشيء وغريب الأطوار بعض الشيء. كان الفتيان ينادونه "الأبله"، ويحاولون السخرية منه. وأتذكر أنه في إحدى المرات انقلب عليهم بقوة هائلة، وكأنها قوة شيطانية، فتركوه وشأنه بعد ذلك، وكسب تدريجيًا احترام حتى أكثر زملائه طيشًا)".

ويذكر البروفيسور كامبل أن أول إشارة إلى دراسات ماكسويل الرياضية وردت في رسالة كتبها إلى والده بعد عيد ميلاده الثالث عشر بقليل6، جاء فيها:

"بعد أن وصفت فرقة (المغنين الفيرجينيين)، وبين أسئلة عن بعض الحيوانات الأليفة في غلينلير، ذكرتُ كخبر عادي أنني صنعتُ رباعي الوجوه، وخماسي الوجوه، وجسمين آخرين لا أعرف اسميهما".

لم نكن قد بدأنا دراسة الهندسة بعد، ولم يكن قد تعلّم بعد تعريفات إقليدس؛ ومع ذلك لم يكتفِ بفهم طبيعة المجسمات المنتظمة الخمسة بما يكفي لصنعها من الورق المقوّى بدقة تقريبية، بل ابتكر أيضًا مجسمات متماثلة أخرى مشتقة منها، لا تزال نماذج منها (كما حُسّنت عام 1848) موجودة في مختبر كافنديش.

ولا يُعرف من لفت نظره أول مرة إلى الهرم والمكعب وما شابه؛ ربما صادف وصفًا لها في كتاب ما. لكن الحقيقة أن خياله، كخيال الإغريق القدماء، استوقفته هذه النماذج الكاملة التماثل في وقت مبكر، وأتقنها حتى شرع في صنعها بيديه. وما يدل على أنه اعتبر هذه اللحظة ذات

شأن أكبر مما قد توحي به الرسالة هو العناية التي أولى بها حفظ هذه الأشياء الهشّة، حتى إنها (أو بدائلها المصنوعة عام 1848) لا تزال موجودة بعد سبعة وثلاثين عامًا.

وكان يقضي عطلة الصيف في غلينلير، حيث شاركته ابنة عمّه الآنسة جميما ويدربرن في اللعب. وقد ترك لنا قلمها الماهر صورًا مسلية عديدة عن تلك الفترة، أعاد البروفيسور كامبل نشر بعضها. وكانت هناك رحلات ونزهات شتى، ولعبة جديدة عُرفت باسم "الشيطان على عصوين" وفّرت تسلية لا تنتهي. أما عطلة الشتاء فكان يقضيها غالبًا في بينيكويك، وأحيانًا في غلاسكو مع البروفيسور بلاكبيرن أو البروفيسور و. طومسون (اللورد كلفن لاحقًا).

وفي أكتوبر 1844 رُقي ماكسويل إلى صفّ المدير. وكان جون وليامز، الذي أصبح فيما بعد رئيس شمامسة كاردجان ورجلًا بارزًا من خريجي كلية باليول، هو المدير، وكان هذا التغيير مهمًا جدًا بالنسبة لماكسويل. كتب إلى والده:
"أنا أحبّ (ب...) أكثر من (ك...). لدينا الكثير من الدعابات، وهو يتكلم كثيرًا، ولسنا مضطرين لتحليل الكلمات المملّ بتكرار. وفي الإنجليزية، ملتون أفضل من تاريخ اليونان"....

وكان (ب...) لقب الأولاد للمدير، و(ك...) للسيد كارمايكل، الأستاذ الثاني. وهذه7 رواية عن أول مقابلة لماكسويل مع المدير:
المدير: "من أي جزء من غالاوي جئت؟"
ج. ك. م.: "من وادي أور. تُهْجى أو، آر، آر، أو أو، آر، آر".

وبدأت دراسة الهندسة، ووجد ماكسويل في أستاذ الرياضيات، السيد غلوغ، معلمًا موهوبًا بحق. وهنا ظهرت تفوّقات ماكسويل الكبيرة على كثير من رفاقه. فيقول البروفيسور كامبل: "كان يبدو في قلب الموضوع حين لم يكونوا بعد إلا عند الأطراف؛ لكن التنافس الطفولي نقطةً بنقطة مع مثل هذا العقل كان منبهًا صحيًا للغاية، حتى إن مجرّد تشغيل ملكاته كان متعة خالصة. ومع ماكسويل، تفرعت دروس الهندسة الأولى فورًا إلى تساؤلات أصبحت مثمرة".

وفي يوليو 1845 كتب:
"لقد حصلت على الجائزة الحادية عشرة في المنح الدراسية، والأولى في الإنجليزية، وجائزة في الشعر الإنجليزي، والميدالية الرياضية. حاولتُ الفوز بجائزة معرفة الكتاب المقدس، لكن هاملتون في الصف السابع حصل عليها. نافسنا على الميدالية يوم الخميس. كنت قد أنجزت كل شيء وعدت للبيت في الثانية والنصف، لكن كامبل بقي حتى الرابعة. كنت متعبًا بعض الشيء من كتابة التمارين من التاسعة حتى الثانية والنصف.

ذهبنا أنا وكامبل (مرة أخرى إلى الثَّغرة) اليوم في بورتوبيللو. أستطيع أن أسبح قليلًا الآن. حصل كامبل على 6 جوائز. وقد وصلته رسالة كُتبت باكرًا جدًا تهنئه على ميداليتي؛ لكن لا منافسة بيننا، كما يقول (ك...) كارمايكل".

وبعد صيف قضاه في معظمه في غلينلير، عاد مع والده إلى إدنبرة لقضاء الشتاء، وبدأ، وهو في الرابعة عشرة من عمره، يحضر اجتماعات الجمعية الملكية في إدنبرة. وفي جمعية الفنون التقى بالسيد

ر. د. هاي، الرسام الزخرفي، الذي كان مهتمًا بمحاولة ردّ الجمال في الشكل واللون إلى مبادئ رياضية. وكان كليرك ماكسويل مولعًا بمسألة كيفية رسم شكل بيضوي كامل، فابتكر طريقة لرسم المنحنيات البيضاوية، أحالها والده إلى البروفيسور فوربس لطلب نقده واقتراحاته. وبعد أن ناقش البروفيسور فوربس الأمر مع البروفيسور كيلاند، كتب ما يلي8— :

»عزيزي سيدي، —— يسعدني أن أجد اليوم، من الأستاذ كيلاند، أن رأيه في ورقة ابنك يتفق مع رأيي، وهو أنها بالغة الذكاء، مشرفة له للغاية، ونحن نعتقد أنها طريقة جديدة للنظر في المنحنيات العليا من حيث علاقتها بالبؤر. ولسوء الحظ، يبدو أن هذه القطوع البيضاوية منحنيات من رتبة عالية جدًا وصعبة المراس، بحيث إن الطريقة الأنيقة في الوصف قد لا تؤدي إلى بساطة مماثلة في دراسة خواصها. لكن هذه ليست النقطة الآن. إذا رغبتَ، فأعتقد أن بساطة وأناقة الطريقة تخولها أن تُعرض أمام الجمعية الملكية. —— صدقني، يا عزيزي سيدي، المخلص لك،
جيمس د. فوربس«.

ونتيجةً لذلك، قُدمت أول ورقة منشورة لماكسويل أمام الجمعية الملكية بإدنبرة في السادس من أبريل عام 1846، وكان مؤلفها لم يتجاوز الخامسة عشرة من عمره. وكان عنوانها كالآتي: »في وصف المنحنيات البيضاوية وتلك التي لها تعدد في البؤر. بقلم السيد كليرك ماكسويل الابن. مع ملاحظات للأستاذ فوربس. قُدمت بواسطة الأستاذ فوربس«.

وجاء في مذكرات والده:

»الاثنين 6 [أبريل 1846]. الجمعية الملكية مع جيمس. قدّم الأستاذ فوربس شرحًا لبيضاويات جيمس. حظيت باهتمام كبير واستحسان عام«.

وكانت هذه بداية صداقة مدى الحياة بين ماكسويل وفوربس.

المنحنيات التي درسها ماكسويل لها خاصية أن المجموع الناتج عن إضافة المسافة من أي نقطة على المنحنى إلى إحدى البؤر، مضافًا إليها مضاعف ثابت للمسافة من نفس النقطة إلى بؤرة ثانية، يظل دائمًا ثابتًا.

وتكتسب هذه المنحنيات أهمية كبيرة في نظرية الضوء، إذ إنه إذا مثّل هذا العامل الثابت معامل الانكسار لمادة ما، فإن الضوء الخارج من إحدى البؤر في الهواء، والمنكسر عند سطح المادة الذي له شكل إحدى بيضاويات ماكسويل، سينكسر بحيث يتجمع في البؤرة الثانية.

في نفس الوقت تقريبًا كان مشغولًا بتحقيقات حول خواص الجيلاتين والجاتا-برشا، والتي يبدو أنها استوحت من «نظرية الأنهار الجليدية» لفوربس.

وقد فشل في الحصول على الميدالية الرياضية عام 1846 ـــ ربما بسبب هذه الأبحاث ـــ لكنه واصل دراسته في المدرسة حتى عام 1847، حين غادرها وكان الأول في الرياضيات والإنجليزية، وقريبًا من الأول في اللاتينية.

في عام 1847 كان يعمل على المغناطيسية واستقطاب الضوء .وفي ذلك العام أخذه خاله، السيد جون كاي، ليرى ويليام نيكول، مخترع المنشور المستقطِب، الذي أراه الألوان التي يظهرها الضوء المستقطب بعد مروره في زجاج غير مصلد. وعند عودته صنع ماكسويل بولاريسكوب بعاكس زجاجي. كان هيكل الجهاز الأول من الورق المقوى، ثم صنع نسخة أفضل من الخشب. استخدم عدسات صغيرة مثبتة على الورق المقوى عند الحاجة إلى شعاع مخروطي. وبواسطة هذا الجهاز فحص الأشكال التي تظهرها قطع الزجاج غير المصلدة، والتي أعدها بنفسه؛ وبواسطة الكاميرا اللوسيدا وصندوق ألوان أعاد إنتاج هذه الأشكال على الورق، حرصًا على ألا يرسم أي خطوط خارجية، بل يُظلل كل نطاق لوني بحيث يندمج تدريجيًا مع الذي يليه. وأرسل بعض هذه الرسوم الملوّنة إلى نيكول، وكان مكافأته أن تلقى بعد فترة قصيرة زوجًا من المناشير التي صنعها نيكول بنفسه. وقد اعتز ماكسويل بهذه المناشير دائمًا. ومرة، عندما كان في ترينيتي، كادت العلبة الصغيرة التي تحتويها أن تُرمى مع مخلفات عاملته أثناء العطلة. وقد توفيت العاملة قبل بداية الفصل، ولم يُسترد الصندوق إلا بعد بحث دؤوب بين متعلقاتها. ومنذ ذلك الحين حُفظت بعناية أكبر، وهي الآن ــــ مع البولاريسكوب الخشبي وقطع الزجاج غير المصلد والرسوم المائية ــــ معروضة في إحدى خزائن مختبر كافندش.

في ذلك الوقت، كان الأستاذ بي. ج. تيت زميلًا له في الأكاديمية، واعترفا معًا بأنهما أفضل تلميذين في الرياضيات في المدرسة. ويروي الأستاذ كامبل أنه «رُئي أنه من المستحسن أن نتلقى دروسًا في العلوم الطبيعية، فأحد أساتذة الكلاسيكيات أعطانا دروسًا من كتاب دراسي...

والشيء الوحيد الذي أذكره بوضوح هو أن ماكسويل وبي. ج. تيت كانا يعرفان عن الموضوع أكثر من معلمنا«.

ويعطينا الأستاذ تيت وصفًا مثيرًا لتلك الأيام في نعيه لماكسويل المنشور في «وقائع الجمعية الملكية بإدنبرة، 1879–1880»، ومنه ما يلي:

»حين تعرفت لأول مرة على كليرك ماكسويل، قبل نحو خمس وثلاثين سنة، في أكاديمية إدنبرة، كان سابقًا عليّ بسنة، إذ كان في الصف الخامس بينما كنت في الرابع.
في البداية كان يُنظر إليه في المدرسة على أنه خجول وبطيء. لم يكن له صداقات، وكان يقضي عطلاته القليلة في قراءة الأغاني الشعبية القديمة، ورسم مخططات غريبة، وصنع نماذج ميكانيكية بدائية. وكان انغماسه في هذه الاهتمامات، التي لم يفهمها زملاؤه (الذين لم يكونوا قد عرفوا الرياضيات بعد)، سببًا في أن يُطلقوا عليه لقبًا غير لطيف، لا يزال يتذكره كثير من زملاء هذه الجمعية. لكن في منتصف مسيرته المدرسية فاجأ رفاقه بأن أصبح فجأة من ألمع التلاميذ، فنال الجوائز العليا، وأحيانًا الأعلى، في المنح الدراسية والرياضيات وتأليف الشعر الإنجليزي. ومنذ ذلك الحين أصبحت علاقتي به وثيقة جدًا، وناقشنا معًا — بحماسة الصبيان — عددًا كبيرًا من المسائل الطريفة، أذكر منها خصوصًا مقاطع المستوى المختلفة للحلقة (أو الطارة)، وشكل المرآة الأسطوانية التي تُظهر للمرء صورته غير مقلوبة. وما زلت أحتفظ ببعض المخطوطات التي تبادلناها عام 1846 وبداية 1847.
أما مخطوطات ماكسويل فكانت عن: «البندول المخروطي»، «بيضاويات ديكارت»، «الميلويد والأبيويد»، و«المنحنيات الثلاثية

البؤر». كلها مكتوبة على شكل براهين هندسية متسلسلة. والثلاثة الأخيرة مرتبطة بورقته الأولى المنشورة التي قدمها فوربس إلى هذه الجمعية ونُشرت في «وقائعها»، المجلد الثاني، بعنوان: «في وصف المنحنيات البيضاوية وتلك التي لها تعدد في البؤر» (1846). وعندما كُتبت هذه الأوراق لم يكن قد تلقى أي تعليم في الرياضيات سوى بعض كتب إقليدس وأبسط عناصر الجبر«.

وفي نوفمبر 1847 التحق كليرك ماكسويل بـ جامعة إدنبرة، حيث درس الرياضيات على يد كيلاند، والفلسفة الطبيعية على يد جيمس د. فوربس، والمنطق على يد السير و. ر. هاملتون. وفي ذلك الوقت، وفقًا للأستاذ كامبل:

»ظل يثير بعض القلق لدى الأكثر تقليدية من أصدقائه بأصالته وبساطة أسلوبه. كانت ردوده في الأحاديث العادية غير مباشرة وملغزة، وغالبًا ما تُقال بتردد وبنغمة رتيبة. ومع أنه كان أنيقًا في مظهره، فقد كان لديه نفور راسخ من مظاهر الزينة كالقمصان النشوية والقفازات. وكان لديه رعب ديني من إتلاف أي شيء، حتى قصاصة ورق. كان يفضل السفر في الدرجة الثالثة بالقطارات قائلاً إنه يفضل المقعد الصلب. وعند المائدة كان كثيرًا ما يبدو شاردًا عما يجري، منشغلًا بمراقبة تأثيرات انكسار الضوء في كؤوس الماء، أو بمحاولة تجربة بعينيه — رؤية حول الزوايا، صنع مناظير وهمية، وما إلى ذلك. وكانت الآنسة كاي تستدعي انتباهه بقولها: «جامسي، أنت في سُكرة». لم يذق الخمر قط؛ وكان يخاطب الجميع، عاليهم وسافلهم، بنفس النبرة تمامًا. من ناحية أخرى، كان أساتذته — وفوربس قبل الجميع — قد كوّنوا أعلى رأي في أصالته الفكرية وقوته؛ كما أن

بعض المراقبين ذوي الخبرة، حين شاهدوا إخلاصه العميق لأبيه، بدأوا يدركون شيئًا من صفاء قلبه البطولي. أما رفاقه في الجامعة، الذين صار قادرًا الآن على اختيارهم، فقد كانوا يجدون في دعابته الغريبة متعة لا تنتهي. وكان أقرب أصحابه، بعد أن التحقتُ أنا بجامعة جلاسجو، أخي روبرت كامبل (الذي كان لا يزال في الأكاديمية)، وبي. ج. تيت، وألان ستيوارت. ذهب تيت إلى بيتَرهوس، كامبريدج، عام 1848 بعد عام واحد فقط في جامعة إدنبرة؛ وتوجه ستيوارت إلى نفس الكلية عام 1849؛ أما ماكسويل فلم يذهب حتى عام 1850«.

خلال هذه الفترة كتب ورقتين هامتين: الأولى عن «المنحنيات الدحرجية» قرأها أمام الجمعية الملكية بإدنبرة الأستاذ كيلاند في فبراير 1849 (إذ «لم يكن من اللائق أن يصعد صبي بسترة قصيرة المنصة»)، والثانية عن «اتزان الأجسام المرنة» ظهرت في ربيع 1850.

وكان يقضي عطلته في جلينلير، ونعرف من رسائله إلى الأستاذ كامبل وغيره كيف كان يمضي وقته هناك.

في رسالة بتاريخ 26 أبريل 1848، كتب:

»يوم السبت، تسلق الفلاسفة الطبيعيون قمة آرثر سيت حاملين البارومتر. وضعه الأستاذ في الأعلى... لكنه لم يضعه مستقيمًا، فجعل التل يزداد ارتفاعًا خمسين قدمًا؛ لكننا أصلحناه لاحقًا«.

وفي رسالة في يوليو من نفس العام وصف مختبره: »لقد أنشأت ورشة منتظمة الآن فوق غرفة الغسيل عند البوابة، في عليّة. لدي باب قديم موضوع على برميلين، وكرسيان أحدهما آمن، وسقف زجاجي يمكن أن ينزلق صعودًا وهبوطًا. على الباب (أو الطاولة) يوجد مجموعة من الأوعية والأباريق والأطباق وجرار المربى، تحتوي ماءً وملحًا وصودا وحمض الكبريتيك وزاجًا أزرق وخام جرافيت؛ وأيضًا زجاج مكسور وأسلاك حديد ونحاس، وصفائح نحاس وزنك، وشمع عسل وشمع ختم وطين وصمغ وصوف نباتي وعدسة وجهاز جلفانيك من نوع سمي، وعدد لا يُحصى من الخنافس والعناكب وقمل الخشب التي تسقط في السوائل المختلفة وتسمم نفسها. أنوي أن أُنشئ بعض البطاريات الجلفانية في جرار المربى؛ لكن يجب أولًا أن أُغلف داخلها بالنحاس، لذا فأنا أُجري تجارب على أفضل طرق الطباعة الكهربية. لذلك فأنا أصنع أختامًا نحاسية عليها رسم خنفساء. في البداية، ظننت أن الخنفساء موصل جيد، فدفنتها في الشمع (دون قسوة، لأني قتلتها في ماء مغلي لم تتحرك فيه أبدًا)، تاركًا ظهرها بارزًا؛ لكنها لم تصلح. ثم أخذت طبعة منها في شمع الختم، وضغطت شمعًا في التجويف، وغطيتها بالجرافيت بفرشاة؛ لكن ذلك لم يصلح أيضًا. وأخيرًا استخدمت أصابعي وفركتها، فكان ذلك أنجح وسيلة لتطبيق الجرافيت. عندها تغلفت بالنحاس بشكل رائع. وأذيب الشمع بالعدسة، لأن ذلك أنظف وسيلة لإحداث حرارة قوية، لذا أستخدمها في معظم الأمور التي تحتاج حرارة. اليوم أدهشتُ الأهالي كالآتي: أخذت بلورة من الزاج الأزرق وسلطت العدسة عليها، فأزلت عنها الماء وتركت مسحوقًا أبيض. ثم فعلت الشيء نفسه مع بعض صودا الغسيل، وخلطت المسحوقين

الأبيضين، وجعلت أحد الأهالي يبصق عليهما، فتحولا إلى اللون الأخضر بتبادل متبادل، هكذا:

1. كبريتات النحاس وكربونات الصودا.

2. كبريتات الصودا وكربونات النحاس (أزرق أو أخضر)«.

وعن قراءاته قال:

»أقرأ الآن كتاب هيرودوت ‘يوترپه’، بعد أن أخذت هذا المنحى — أي أنني أحيانًا أتمكن من حل البراهين، وأقرأ التفاضل والتكامل، وبواسون، ومقالة هاملتون، إلخ«.

وفي سبتمبر كان مشغولًا بالضوء المستقطب. «ذهبنا أمس إلى كاسل دوغلاس، وحصلنا على بلورات من نترات البوتاسيوم، والتي قطعتها اليوم إلى صفائح على أمل رؤية الحلقات«.

في يوليو 1849 كتب ماكسويل يقول:
»لقد نصبتُ الجهاز الذي خططت له أثناء زيارتك العام الماضي لعرض الحلقات في البلورات، وهو يعمل جيدًا للغاية. كما أجريت بعض التجارب على المواد الهلامية المضغوطة لإثبات براهيني حول هذا الموضوع. التجربة الرئيسية كانت كالآتي: يُسكب الجيلي وهو ساخن في الفراغ الحلقي بين أسطوانة ورقية وقطعة فلين؛ ثم عند التبريد يُدار الفلين فيتعرض الجيلي للضوء المستقطب، فتظهر إشارة عرضية (x) وليست زائد (+)، مع حلقات تتناسب عكسيًا مع مربع

نصف القطر، وكل ذلك تحقق بدقة. هيب!... إذن فقد ثبتت الدعوى (Q.E.D.).»

وفي 22 مارس 1850 كتب مجددًا:
»في ورشة الميكانيكا العملية كنتُ أقوم بتشغيل بعض الأجهزة الغريبة. أما دراساتي الخاصة فكانت قراءة "محاضرات" يونغ، و"مبادئ الميكانيكا" لوِليس، و"الهندسة والميكانيكا" لموزلي، وكتاب ديكسون عن الحرارة، و"المرجع في البصريات" لموانيو. هذا الأخير تحليل شامل لكل ما أُنجز في علم البصريات منذ فرنل وحتى نهاية 1849، وهناك مجلد آخر قادم سيكمل العمل. وفيه، إلى جانب البصريات العامة، كل ما يتعلق بالظواهر المصاحبة للضوء مثل الحرارة، والفعل الكيميائي، والأشعة الفوتوغرافية، وتأثيره على النباتات، وغير ذلك.

أما عن أفكاري، فهي قليلة لأنني لا أشغل بالي بها الآن. لدي فكرة حول التواء الأسلاك والقضبان، مؤجلة للعطلة؛ وتجارب على تأثير الضغط على الزجاج والجيلي وغيرهما، ببيانات رقمية دقيقة؛ وأوراق علمية لجمعية الفيزياء والرياضيات (التي ستعود للنشاط بجدية في الدورة القادمة!) حول العلاقة بين الثوابت البصرية والميكانيكية وأهميتها؛ وكذلك حول الجسور المعلقة والمنحنيات المرنة. وقد عُيِّنت أنا وألكسندر كامبل وأغنيو لدراسة ظاهرة الشهب الدورية وإعداد قائمة بالظواهر المراد رصدها يومي 9 أغسطس و13 نوفمبر. وسيُحمل بارومتر الجمعية إلى قمة "آرثر سيت" في نهاية الدورة عندما يصعد إليها فوربس، ودُعي جميع الطلاب للحضور حتى يُعترف رسميًا بوجود الجمعية«.

وأخيرًا تقرر أن يلتحق ماكسويل بجامعة كامبريدج. كان زميله تيت قد انتقل إلى كلية "بيترهاوس" منذ عامين، وانضم إليه آلان ستيوارت عام 1849، وبعد نقاش طويل اتفق على أن يلتحق ماكسويل بنفس الكلية.

يصف تيت هذه المرحلة قائلًا:

»في شتاء 1847 كنا معًا في دروس فوربس وكيلاند، حيث أحرز ماكسويل تميزًا كبيرًا. وكان فوربس يُعطيه مكانة خاصة، إذ سمح له بالاستخدام الحر لأجهزة المعمل لإجراء تجاربه الخاصة. وقد تأخر عن معظم زملائه السابقين، إذ قضى ثلاث سنوات في جامعة إدنبرة يعمل فيها (دون أي إشراف) بالأجهزة الفيزيائية والكيميائية، ويقرأ بشغف مختلف الكتب العلمية في المكتبة. وخلال هذه الفترة كتب بحثين قيمين نُشرا في "المعاملات" عن "نظرية المنحنيات المتدحرجة" و"اتزان الأجسام المرنة". وهكذا جاء إلى كامبريدج في خريف 1850 محمّلًا بكمٍّ هائل من المعرفة بالنسبة لشاب في سنه، لكنها كانت في فوضى تامة أزعجت أستاذه الخصوصي المنهجي. ومع أن ذلك الأستاذ كان وليام هوپكنز، إلا أن التلميذ سلك طريقه الخاص. ويمكن القول بثقة إنه ما من طالب تقدّم لامتحانات الدرجة العليا في السنوات الأخيرة وهو أقل تدريبًا على إنتاج عمل "مربح" من ماكسويل. ومع ذلك، وبفضل قوة عقله وحدها، حصل على المرتبة الثانية (Second Wrangler)، وكان متساويًا مع الأول في الاختبار الأعلى لجائزة سميث. وقد سُجل اسمه في "تقويم" كامبريدج باعتباره من كلية ترينيتي، لكنه في الأصل التحق ببيترهاوس وقضى أول فصل دراسي فيها، وهي كلية صغيرة لكنها قديمة جدًا، أمدّت اسكتلندا حديثًا بغالبية أساتذة الرياضيات والفيزياء الطبيعية في جامعاتها الأربع«.

أما و. د. نيفن فقد كتب في مقدمة أعمال ماكسويل الكاملة (ص. 12):

»يمكن الافتراض بسهولة أن تدريبه التحضيري لمسار كامبريدج كان بعيدًا عن النمط التقليدي. فقد تُرك ذهنه فترة طويلة لينجرف مع ميوله الطبيعية نحو العلم، لكن دون أن يبتعد تمامًا عن أنشطة أخرى. لم يكن رياضيًا بالمعنى الشائع—بل كان ينفر من الصيد—لكنه كان شغوفًا بحياة الريف. كان فارسًا ماهرًا وسبّاحًا جيدًا. ومع ذلك، كان مصدر متعته الكبرى ما وصفه صديقه كامبيل، حين أورد حماسته لاقتباس أبيات من بيرنز تصف الشاعر وهو يستلهم الإلهام وهو يتجول على ضفاف نهر مستسلمًا لأحلامه. لم يكن ماكسويل مجرد محب للشعر، بل شاعرًا أيضًا، كما تشهد على ذلك القصائد الجميلة التي جمعها كامبيل. لكنه أدرك أن دعوته الحقيقية هي العلم، ولم يعتبر شعره إلا مجرد تسلية. لقد جمع بين إخلاص متجدد للعلم، وميول للتأمل الفلسفي، وحب للأدب الإنجليزي خاصة الشعر، وهذه الصفات—وقد زُرعت في عقل قوي نقي—كانت عدته لبداية مسيرته في كامبريدج. وإلى جانب ذلك، كان قد اطّلع بالفعل، كما يظهر من أبحاثه التي قدمها للجمعية الملكية في إدنبرة، على قراءات علمية واسعة ومتنوعة. وقد جاء، كما قال تيت، محمّلًا بكم هائل من المعرفة لشاب في مثل عمره، لكن في حالة فوضى أرّقت أستاذه الخصوصي المنظم«.

الفصل الثاني

الحياة الجامعية في كامبريدج

لم يمكث ماكسويل طويلًا في كلية *بيترهاوس*؛ فقبل نهاية فصله الدراسي الأول انتقل إلى *ترينيتي كوليدج*، حيث سُجل تحت إشراف الدكتور طومسون في 14 ديسمبر 1850. بدا لتلميذه الجديد شابًا خجولًا مترددًا، لكنه سرعان ما أدهشه حين أخرج حزمة أوراق —— ربما نسخًا من أبحاث كان قد نشرها بالفعل —— وقال له» *لعل هذه تبرهن أنني لست غير جدير بالالتحاق بكليتكم.*«

جاء هذا الانتقال بناءً على نصائح كثير من أصدقائه؛ إذ رأوا أن كثرة الطلاب المتفوقين في الرياضيات (High Wranglers) مؤخرًا في بيترهاوس وصِغر حجمها قد يقللان من فرص الحصول على زمالة هناك، مقارنةً بترينيتي. ولم يندم ماكسويل قط على تلك الخطوة؛ إذ لم تكن مسألة الزمالة تشغل باله كثيرًا، لكن الكلية الأكبر وفرت له فرصًا أوسع للتعلم الذاتي، ومكّنته من التعرف على أصدقاء لم يكن ليلتقي بهم لولا ذلك.

السجل التفصيلي لحياته الجامعية ليس كاملًا؛ فقد فُقدت رسائله إلى والده، لكن ما تبقى من ذكريات أصدقائه يكفي لرسم صورة عنها. في البداية سكن في *كينغز بريد* مع زميل قديم من إدنبرة، هو سي. إتش. روبرتسون. حضر محاضرات الكلية في الرياضيات، رغم بساطتها، وتلقى دروسًا خاصة لدى بورتر من بيترهاوس. وكتب إليه والده في

نوفمبر 1850 قائلًا» :*هل زرت الأستاذ سيدجويك في ترينيتي، وستوكس في بمبروك؟ إن لم تفعل فيجب أن تفعل. فستوكس سيكون أقرب إلى ميولك إن تبناك. أما سيدجويك فهو أيضًا عالم بارز، وإن التحقتَ بالجيولوجيا فسيكون معرفة لا تُقدّر بثمن.«*

في سنته الثانية أصبح تلميذًا لهوبكنز، المدرس العظيم في الرياضيات، كما حضر محاضرات ستوكس، وهناك بدأت صداقة دامت حتى وفاته. في أبريل 1852 انتُخب زميلًا (Scholar) وحصل على غرفة في الكليةG) ، المحكمة القديمة .(وفي يونيو 1852 بلغ سن الرشد؛ فكتب إليه والده قبلها بيوم» :*آمل أن تكون رصينًا وأنت بالغ كما كنت وأنت قاصر.«*

كان العام الأكاديمي التالي (أكتوبر 1852 – يونيو 1853) مزدحمًا للغاية؛ فقد انشغل بالتحضير المكثف لامتحان *التريبوس*، حتى أرهق نفسه بشدة. وأصيب بمرض أثناء إقامته قرب *لوويستوف* عند القس سي. بي. تايلر، خال أحد زملائه في الكلية. وقد وصف بنفسه مرضه في رسالة إلى الأستاذ كامبل بتاريخ 14 يوليو 1853:

»وصلني خطابك في الوقت المناسب عند عودتي إلى كامبريدج. بعد الامتحان زرت القس سي. بي. تايلر (خال أحد الزملاء الذي ربما تعرفه باسم "المستجد"، ومؤلف العديد من الكتيبات التعليمية). قضينا وقتنا في نزهات قصيرة، وأعمال رعوية وتعليمية، وحياة أسرية. كنت أنوي العودة في 18 يونيو، لكن في 17 منه شعرت بتوعك، فاتخذت الإجراءات اللازمة لأتعافى — أي ذهبت إلى الفراش، وقررت أن أستعيد صحتي. لكن الأمر استمر أكثر من أسبوعين، وخلالها تلقيت

عناية فاقت توقعاتي (رغم أنني كنت أتوقع الكثير). فعندما أصبحت عاجزًا تمامًا، لا أستطيع الجلوس دون إغماء، قام السيد تايلر بخدمتي بطريقة جعلتني لا أشعر بأني أثقل عليهم. وكذلك السيدة تايلر، وأبناء أخيه بذلوا قصارى جهدهم. أبقوني في سعادة طوال تلك الفترة حتى استعدت قدرتي على المشي وقوتي. عدت في 4 يوليو. النتيجة أنني صرت أراسل السيد تايلر، ودخلت في صلات وثيقة مع أبناء أخيه، وسأحدثك عنهم لاحقًا. منذ عودتي حضرت دروس هوپكنز، لكن بموافقته لم أبدأ العمل المكثف بعد. أنا أحرز تقدمًا، والجهد الآن لا يرهق ذهني المرهق مسبقًا«.

خلال هذه الفترة كتب عدة مقالات لمجلة *الرياضيات في كامبريدج ودبلن*، وسنعود إليها لاحقًا. وكان عضوًا في جمعية نقاش تُعرف باسم *الرسل(The Apostles)* ، ولا يزال بعض مقالاته فيها محفوظًا لدى الأستاذ كامبل. ويرى نيفن، في مقدمة الأعمال الكاملة لماكسويل، أن كتابة هذه المقالات أسست لتلك الصياغة الأدبية الدقيقة التي تميز كتاباته العلمية لاحقًا.

من بين أصدقائه آنذاك: تيت، تشارلز ماكنزي من كايوس (الذي صار أسقفًا مبشرًا في أفريقيا الوسطى)، هنري وفرانك ماكنزي من ترينيتي، دروپ (ثالث المتفوقين عام 1854)، جيدج، إسحق تايلور، بلاكيستون، إف. دبليو. فارار، إتش. إم. باتلر، هورت، □ي. لوشنغتون، سيسيل مونرو، جي. دبليو. إتش. تايلر، و دبليو. إن. لوسون. وقد ترك بعض هؤلاء، ممن عاشوا بعده، ذكريات غنية عن أيامه الجامعية.

كتب لوسون قائلًا:

»لا بد أن كثيرًا من أشعاره الطريفة ما يزال موجودًا إن عُثر عليها، فقد كان ماكسويل لا يكف عن نظم مثل هذه الأبيات، ويعرضها على أصدقائه بابتسامة ماكرة، وكان هو نفسه أكثر من يستمتع بروحها الفكاهية.
أذكر أنه جاءني صباحًا بنسخة من أبيات تبدأ بـ "إذا صادف جسدٌ جسدًا آخر في الهواء"، وقد حوّل فيها الأغنية الشهيرة إلى وصف لقوانين تصادم الأجسام الصلبة.

وكتب أيضًا وصفًا لإحدى الاحتفالات الجامعية — لا أذكر أيها — ينتهي بعبارة" *وفي الوسط كان المتفوقون يلعبون بالرموز* ."وهذه الكلمات، مهما كان مقصودها، وصفت بالفعل قدرته المذهلة. أتذكر أن محاضرنا ملأ السبورة ثلاث مرات وهو يحاول حل مسألة صعبة في هندسة الثلاثة أبعاد، ولم يصل إلى النتيجة، حين تدخل ماكسويل وسأل إن كان يمكن حلها بطريقة هندسية، ثم رسم شكلًا وأتم الحل في بضعة أسطر.

كان ماكسويل مولعًا بالحديث في شتى المواضيع. وكنا زملاء عند هوپكنز (على تباعد كبير في المستوى)، وأتذكر جيدًا أنه بينما كنت أقضي الليل وصباح اليوم التالي غارقًا في مسائل هوپكنز دون نتيجة، كان ماكسويل يزورني للحديث، وأنا أتمنى لو يبتعد، ثم قبل موعدنا مع هوپكنز بنصف ساعة يقول" :*حسنًا، عليّ الآن أن أذهب إلى مسائل العجوز هوپ* ".وعند لقائنا كان قد حلها كلها!

قال لي هوپكنز عن ماكسويل، قبل أو بعد نيله الدرجة" *من المستحيل أن يخطئ هذا الرجل في التفكير في أي مسألة فيزيائية* ".وهوپكنز، كما تعلمون، كان له من الخبرة في العقول الرياضية أكثر من أي رجل في زمنه«.

وفي مذكراته بتاريخ 15 يوليو 1853 كتب لوسون: »كان يتحدث إليّ عن ماكسويل هذا المساء. قال إنه بلا شك أعجب رجل صادفه في حياته كلها؛ وإنه يبدو من المستحيل أن يخطئ ماكسويل في أي مسألة فيزيائية؛ لكنه ضعيف جدًا في التحليل الرياضي. يراه عبقريًا عظيمًا بكل ما يصاحب العبقرية من غرابة، ويتنبأ بأنه سيصبح يومًا ما أحد المنارات في علم الفيزياء ــــ وهو تنبؤ يشاركه فيه كل زملائه بإصرار«.

وكم من قراء كتابه *الكهرباء والمغناطيسية* لمسوا صدق هذا الرأي: دقة حدسه الفيزيائي، يقابلها في بعض الأحيان ضعف تحليله الرياضي.

وقد ألقى صديقه الدكتور باتلر، بعد وفاته بعشرة أيام فقط (16 نوفمبر 1879)، خطبة جامعة قال فيها:

»إنه لأمر مهيب ــــ حتى أقل الناس تأملًا يتأثر به ــــ حين يرحل عقل عظيم إلى الصمت فلا نراه بعد ذلك. إن فقدًا كهذا، وفراغًا كهذا، يثقل اليوم على قلوب الكثيرين هنا. قلّ أن تُطفأ في هذا البيت العظيم للفكر والمعرفة شعلة مضيئة مثل تلك التي يبكيها الآن كثير من الأعلام، هنا وفي أماكن أخرى بعيدة.

كنتُ أتمنى لو وُكل هذا المقام إلى لسان أقدر مني، ليعبر عن مشاعر المودة الممزوجة بالإجلال التي تغمر قلوبًا كثيرة اليوم. كلماتي فقيرة، لكنها صادرة من القلب. أنتم تعرفون، إخوتي، كم نتابع بفخر شديد مسيرة أولئك الذين أحببناهم واحترمناهم في أيام دراستنا الجامعية. قد نراهم قليلًا، وقد لا نتبادل معهم سوى رسائل نادرة، لكن أسماءهم لا تصبح يومًا أسماء عادية، ولا يغدو الواحد منهم مجرد شخص مثل سائر الناس.

حين جئت إلى ترينيتي قبل ثمانية وعشرين عامًا، كان جيمس كليرك ماكسويل يبدأ سنته الثانية. وكانت مكانته بيننا — وأشهد بين من عاصروه — فريدة. كان الرجل الوحيد المعترف به كعبقري بين طلاب الكلية. وفهمنا حتى حينها، رغم أنه لم يبلغ إلا بالكاد سن الرشد، أنه في مجال بحثه لم يكن مبتدئًا بل كان أستاذًا. كان اسمه معروفًا بين العلماء بالفعل. وإن عاش، فقد كان مؤكدًا أنه واحد من تلك القلة النادرة التي وُهبت لتوسيع حدود المعرفة البشرية. لقد كانت مكانة كهذه كفيلة بأن تُذهب بعقل رجل أقل، لكن صديقنا، الذي كنا جميعًا نفتخر به، والذي بدا وكأنه يربطنا منذ وقت مبكر بعالم الرواد في المعرفة، كان صاحب طبيعة غنية وسخية لا تُفقرها أي نجاحات، وتجعل الإيمان بالخير سهلًا على الآخرين.
لقد فكرتُ كثيرًا أن الذين لم يعرفوا الشيخ الكبير آدم سيدجويك، ولا الشاب النضر المتجدد كليرك ماكسويل، لم يتذوقوا بعد عظمة القوالب التي يُصاغ فيها بعض البشر المميزين. أما عظمة صديقنا العلمية فلم يكن معظمنا قادرًا على الحكم عليها، لكن أيًّا كان يستطيع أن يرى ويعجب بمرح الصبي، وخصوبة اختراعه، وسعة اطلاعه، وعطشه

المتقد للحق، ودقة فكره، واعتدال طبعه، وإجلاله الثابت، ونقائه العجيب من أي أثر للدنيوية في أي من صورها العديدة».

إخوتي، قد تعرفون مثل هؤلاء الرجال بين أصدقائكم في الكلية، مع أنّه لا يمكن أن يوجد في أي عام، أو في أي قرن، إلا القليل جدًا ممّن يملكون العبقرية النادرة للرجل الذي نرثيه. فإذا كان الأمر كذلك، فاقبلوا نصيحة غريب: اشكروا الله على هذه العطية. صدّقوني حين أقول لكم إن مثل هذه البركات لن تأتِيَكم كثيرًا في حياتكم اللاحقة. هناك بركات لا تأتي إلا مرة واحدة في العمر. ومن هذه البركات تلك الرهبة التي نرفع بها أعيننا إلى العظمة والصلاح في صديق من أيام الكلية——فوقنا، أبعد منّا، خارج عن متناولنا العقلي أو الأخلاقي، ولكنه مع ذلك واحد منّا، قريب منّا، منّا نحن. أنتم تعلمون، ولو جزئيًا، كيف أنّ وعد الشباب في هذه الحالة لم يَفِ فقط بل تجاوز التوقعات، وكيف أنّ الرجل الذي كان، منذ أسبوعين فقط، زينة الجامعة، و——هل أكون مخطئًا إذا قلت؟——شبه مكتشف لعالم جديد من المعرفة، كان محبوبًا أكثر مما كان مُعجَبًا به، محتفظًا بعد عشرين عامًا من الشهرة بتلك البشاشة، وتلك البساطة، وذلك الفرح الطفولي بكل جديد ومُدهِش، الذي نفرح بأن نراه دليلًا أكيدًا على العبقرية العلمية الحقيقية.

وتعلمون أيضًا أنه كان مسيحيًا تقيًا كما كان مفكرًا متأمّلًا. ولا أذكر هذا بروح الانتصار في الجدل. ولن أفترض للحظة وجود أي تعارض طبيعي بين العبقرية العلمية والإيمان المسيحي البسيط. ولن أقارنه بآخرين كانت لديهم العبقرية دون الإيمان. فالمسيحية، مع أنها ترحب بهم شاكرة وتثمّنهم غاليًا، لا تحتاج الآن، أكثر مما احتاجت في زمن القديس بولس حين بشر بالصليب في كورنثوس، إلى تأملات

المتفلسفين أو حكمة الحكماء. ولو أردت أن أظهر للناس، خصوصًا الشباب، القوة الحيّة للإنجيل، لما أخذتهم إلى رجل متعلم تقي يعرف كل خزانة العلوم، بل إلى قرية ريفية حيث ظلّت التقاليد الدينية والممارسة التعبدية قائمة خمسين عامًا. هناك يرون الإنجيل حيًا في الأفعال؛ حقائق يتحدث عنها الآخرون، تُرى وتُعرَف؛ روح غير دنيوية، حاضرة بوضوح كل ساعة؛ مواطنة في السماء تُمارس وتتحقق يوميًا. أؤمن أن مثل هذه الشخصيات هي أعظم واعظ لمن يسأل: هل الوحي خرافة، وهل الله مجهول؟ نعم، في معظم الحالات—لا أنكر أن هناك استثناءات—الإيمان البسيط، وربما أكثر من العبقرية التعبدية، له القدرة العظيمة على إزالة الشكوك وغرس قناعات جديدة. ومع ذلك، فبعد أن نقول هذا، يحق لنا أن نشكر الله أن صديقنا كان كما كان، مؤمنًا مسيحيًا راسخًا، وأن عقله الجبّار، بعد أن جاب بحرية في أرجاء الكون اللامحدودة، وكاد أن يلمس ما سماه "أحجار الأساس للكون المادي"، وجد راحته وسعادته الحقيقية في محبة ورحمة ذاك الذي يدعوه أبسط المسيحيين أباه. عن مثل هذا الرجل يمكن أن يُقال حقًا إنه كانت له مواطنة في السماء، وأنه كان ينتظر كمخلّص الرب يسوع المسيح، الذي به صُنعت العوالم التي لا تُعدّ، والذي على شبه صورته سيتشكل جسدنا الجديد الروحي.

وجاء امتحان التريبوس في يناير 1854. وكان من نصيحة والده: "ستحتاج إلى واقيات لليدين من الصوف في قاعة مجلس الشيوخ. وخذ معك شالًا أو بطانية لتلفها حول قدميك وساقيك"، وهي نصيحة سيفهمها جيدًا من يتذكرون كيف كان مجلس الشيوخ في صباح بارد من يناير.

كان ماكسويل قد أعدّ نفسه بعناية لهذا الامتحان. فكتب إلى عمته الآنسة كاي في يونيو 1853 قائلًا: "إذا سأل أحد عن تقدمي في الرياضيات، فقولي له إنني مشغول بترتيب كل شيء بحيث أستطيع أن أعبر عنه بوضوح، ليقتنع الممتحن الآن، وليستفيد التلاميذ لاحقًا. إنه عمل ممتع ومقوٍّ جدًا، لكنه لم يكتمل بعد".

ومع ذلك، فقد ترك المرض الذي أصابه في يوليو 1853 أثرًا ما. فقد ذكر البروفيسور باينز أنه قال إنه حين دخل مجلس الشيوخ لأداء أول ورقة شعر أن ذهنه كان شبه فارغ، لكن سرعان ما أصبحت رؤيته العقلية في غاية الصفاء.

وكان الممتحنون: ماكنزي من "كيوس"، الذي كان نصحه سببًا رئيسيًا في انتقاله إلى "ترينيتي"، ووليم والتون من "ترينيتي"، وولستنهم من "كرايست"، وبرسيفال فروست من "سانت جونز."

وعندما نُشرت القوائم، كان "روث" من "بيترهاوس" الأول، وماكسويل الثاني. ثم جاء امتحان جوائز "سميث" بعد أيام قليلة، وأُعلن أن روث وماكسويل متساويان.

وفي رسالة إلى الآنسة كاي بتاريخ 13 يناير، أثناء انتظاره قائمة الأيام الثلاثة، كتب:

"كل مراسلي كتبوا لي، وهذا لطف، ولم يكتبوا أسئلة، وهذا ألطف. فأجيبك الآن بينما أبطئ السرعة استعدادًا لإعادة الانطلاق، مؤجلًا لويس وستيوارت وغيرهم للأسبوع المقبل، حيث سأعطي تقريرًا عن الأيام الخمسة. هناك عدد كبير هنا الآن، ونحن نعيش في جو مرح عمومًا؛ لكن بعضهم ليسوا على ما يرام، وبعضهم على وشك أن

يُرفَض أو يُسحَب، حسب الحالة، وآخرون يدرسون بجد لدرجة أنهم صاروا غير مرئيين. غدًا أذهب للإفطار مع رجال متوترين، وبعد الطعام أذهب لأسمع قراءة القائمة، وما إذا كانوا قد نجحوا، وأخبرهم بالخبر. وعندما تصدر قائمة الشرف يعمل رجال التصويت كرسل. بوب كامبل يأتي أحيانًا مساءً لنتناقش ونغيّر جو الترفيه. وخلال الامتحان كنت أستقبل رجالًا ليلًا يعملون على الغُتّا بيرتشا والمغناطيسات وغير ذلك. إنه أفضل بكثير من قراءة الروايات أو الأحاديث بعد خمس ساعات ونصف من الكتابة المكثفة".

أما والده، فعندما وصله الخبر، كتب من إدنبرة: "أهنئك من كل قلبي على موقعك في القائمة. أظن أنه أعلى مما توقعه المراهنون، ومساوٍ تقريبًا لما كان هوبكنز يتوقعه. أتمنى لك النجاح في جوائز سميث؛ تأكد من أن تكتب لي النتيجة. سأقابل السيدة موريسون، وأظن أنني سأزور الدكتور جلوغ لأهنئه. فلديه على الأقل ثلاثة تلاميذ نالوا مرتبة الشرف".

وكان أصدقاؤه في إدنبرة مسرورين جدًا. فكتب والده: "أتلقى التهاني من كل صوب، بما في ذلك البروفيسور كيلاند وساندي فريزر وكل من له دراية بالأمر... مساء اليوم أو الاثنين سأنتظر سماع خبر جوائز سميث." ثم كتب مجددًا في 6 فبراير 1854: "جورج ويدربرن دخل غرفتي الساعة الثانية صباحًا البارحة بعد أن قرأ في صحيفة التايمز الصادرة يوم السبت والتي وصلتنا بالقطار السريع... وبما أنك تعادلت مع الأول في الامتحان النهائي، فأنت لست متأخرًا عنه إلا قليلًا".

وكتب أيضًا في 5 مارس 1854:

"حثتني العمة جين على الجلوس لرسم صورتي، لأنها قالت إنك ترغب بها، ومن حقك أن تطلبها بصفتك أحد الناجحين الكبار. جلست أربع مرات للرسام السير جون واتسون غوردون، واللوحة الآن متقدمة جدًا؛ أظنها شديدة الشبه. حجمها متوسط، لتكون رفيقة لصورة دايس التي تجمع والدتك وأنت، والتي قالت العمة جين إنها ستتركها لك".

وهكذا كانت سنوات الإعداد الطويلة قد أوشكت على الانتهاء. فالصانع الماهر صار مجهزًا بأدواته؛ وأصبح قادرًا على العمل لكشف أسرار الطبيعة؛ وأضحى حرًا في توظيف عبقريته ومعرفته في تلك المهام التي شعر أنها الأنسب له.

الفصل الثالث

الأبحاث المبكرة – أستاذ في أبردين

من هذه المرحلة أصبحت حياة ماكسويل سجلًا لمؤلفاته واكتشافاته. ومع ذلك، سيكون أوضح أن نفصل – قدر الإمكان – بين التفاصيل البيوغرافية وبين العرض المفصّل لأعماله العلمية، ونترك هذا للمعالجة المتتابعة في الفصول اللاحقة، مع الإشارة إليه فقط بالقدر اللازم لشرح ما يرد في رسائله.

بقي في كامبريدج حتى عطلة صيف 1854، وكان يقرأ كتاب "المنطق" لجون ستيوارت ميل. وكتب في 25 مارس 1854" :*أشعر بتأثيرات ميل، لكنني أقرأه ببطء. لا أظنه الأخير في مجاله. أعتقد أن الأمر يحتاج إلى مزيد من العمل لإظهار الصلة بين الإحساس والعلم، ولإظهار ما ليست عليه هذه الصلة* ".كما قرأ كتاب بيركلي حول "نظرية الرؤية" وأُعجب به كثيرًا.

وفي الفترة نفسها اخترع منظار العين .(Ophthalmoscope) قال: *"لقد صنعت أداة لرؤية داخل العين من خلال البؤبؤ. كانت الصعوبة في إدخال الضوء عبر تلك الفتحة الصغيرة والنظر في الوقت نفسه؛ لكن تلك الصعوبة ذُللت، وأستطيع أن أرى جزءًا كبيرًا من قاع العين بوضوح، مع صورة للشمعة منعكسة عليه. لا يجد الناس أي إزعاج في الفحص، وقد درّبت الكلاب على الجلوس ساكنة والحفاظ على ثبات أعينها. وعيون الكلاب جميلة جدًا من الداخل—خلفية نحاسية*

اللون مع بقع زاهية رائعة وشبكات من الأزرق والأصفر والأخضر، مع أوعية دموية كبيرة وصغيرة".

بعد العطلة عاد إلى كامبريدج، وتشير رسائله إلى "قرص الألوان" الذي كان يعمل عليه. ففي رسالة إلى الآنسة كاي بتاريخ 24 نوفمبر 1854، كتب:

"لقد كنت مشغولًا جدًا مؤخرًا بأمور عدة، وأبدأ الآن في إعداد أوراق امتحان تشلتنهام الذي عليّ إدارته في 11 ديسمبر تقريبًا. كما أنني أعد أوراقًا لأنهي بها مع تلاميذي. لقد كنت أدير الألوان كثيرًا وحصلت على نتائج دقيقة جدًا، تثبت أن أعين الناس العاديين جميعها متماثلة في البنية، وإن كان بعضها أفضل من الآخر، وأن بعض الناس يرون لونين بدلًا من ثلاثة؛ لكن كل هؤلاء يتفقون فيما بينهم. لقد صنعت مثلثًا للألوان يمكن من خلاله تفسير كل شيء.

"إذا استطعتِ أن تجدي في إدنبرة أشخاصًا لا يرون الألوان (أعرف أن آل ديكسون كذلك)، فرجاءً أخبريني، إذ أرغب في رؤيتهم. لقد علّمت أحدهم هنا حيلة يميز بها الألوان دون خطأ. كما صنعت نظارة للحول، وبدأت العمل مع رجل مصاب بالحول".

وفي عام 1854 كتب ورقة علمية لنفسه، ثم أهداها لاحقًا لصديقه فارار الذي كان على وشك أن يصبح معلمًا في مدرسة مارلبورو، وقدمت لنا هذه الورقة لمحة عن رؤيته للحياة وهو في الثالثة والعشرين من عمره:

"من أراد أن يستمتع بالحياة ويعمل بحرية، فلابد أن يكون عمل اليوم أمام عينيه دائمًا. لا عمل الأمس، لئلا يقع في اليأس؛ ولا عمل الغد، لئلا يصير حالِمًا؛ لا العمل الذي ينتهي مع اليوم، إذ هو عمل دنيوي؛ ولا ذاك الذي يبقى وحده إلى الأبد، إذ لا يستطيع أن يُشكّل به أفعاله.

"سعيد هو من يرى في عمل اليوم جزءًا متصلًا بعمل الحياة وتجسيدًا لعمل الأبدية. أساس ثقته ثابت، لأنه صار شريكًا في اللانهاية. يعمل بجد في مشاريعه اليومية، لأن الحاضر قد أُعطي له كملك له.

"هكذا ينبغي للإنسان أن يكون تجسيدًا للعملية الإلهية للطبيعة، وأن يُظهر اتحاد اللامتناهي بالمتناهي، دون أن يحتقر وجوده الزمني، متذكرًا أنه فيه وحده يمكن للفعل الفردي أن يحدث؛ ودون أن يحجب عن بصره ما هو أبدي، عالمًا أن الزمن لغز لا يستطيع الإنسان احتماله حتى يضيئه الحق الأبدي".

في عطلة عيد الميلاد من ذلك العام مرض والده، فلم يتمكن ماكسويل من العودة إلى كامبريدج في بداية الفصل الشتوي. فكتب من إدنبرة إلى صديقه سي. جي. مونرو في 19 فبراير 1855: *"لن تخطو قدماي بعد الآن على الضفاف الملتوية حتى فصل عيد الفصح... أرغب أن أعرف كم عدد الأسابيع الأكاديمية التي تُحتسب في كل فصل، ومتى تبدأ ومتى تنتهي. راجع التقويم، وإذا وجدت، فدوّن ذلك".*

عاد إلى كامبريدج في فصل مايو، وكان يعمل على حركة الموائع وعلى "قرص الألوان". وقد قُدمت ورقة له بعنوان *"تجارب في*

الألوان كما تُدركها العين "إلى الجمعية الملكية في إدنبرة في 19 مارس 1855. وعُرضت التجارب في جمعية كامبريدج الفلسفية في مايو التالي، ووصف نتائجها في رسالتين إلى والده بتاريخ 5 مايو 1855:

"لقد كانت الجمعية الملكية كريمة معي إذ أرسلت لي ورقتي عن "الألوان" تمامًا حين احتجتها للجمعية الفلسفية هنا. سأعرض عليهم الحيل مساء الاثنين، وقد كنت هناك أجهز تجاربهم على ضوء الغاز. سيكون هناك اجتماع في غرفتي الليلة لمناقشة "نظرية المشاعر الأخلاقية" لآدم سميث، لذا عليّ أن أنظف فوضاي الآن. أعمل مجددًا في الكهرباء، وقد دخلت في أفكار الكتّاب الألمان الثقال. يستغرق الأمر وقتًا طويلًا لترتيب كل المفاهيم التي تحصل عليها من هؤلاء، لكنني آمل أن أصل إلى رؤية واضحة وإلى نظرية مفهومة...

"لقد نجحت تجربة الألوان يوم الاثنين 7 مايو. كنت على وشك قراءة مسودة ورقتي، لكنني غيرت رأيي وتحدثت بدلًا من ذلك، وكان ذلك أنسب. كان هناك عدة رجال يظنون أن الأزرق والأصفر يعطيان الأخضر، فاضطررت أن أصحح لهم الخطأ. حصلت على كتاب هايز عن الألوان من مكتبة الجامعة، وأعمل من خلال العينات، وأطابقها مع القرص. عندي حيلة جديدة بمدّ الخيط أفقيًا فوق القرص بحيث يلمس الجزء العلوي من محوره. حركة المحور تجعل الخيط يهتز متزامنًا مع دوران القرص، وتُرى الألوان في الضباب الناتج عن الاهتزاز. وقد أدار طومسون القرص، ووجد أن مخططي للألوان يوافق تجاربه، لكنه يشك في الألوان البنية: ما تركيبها؟ لقد حصلت على البني الكلسي، وأستطيع أن أُنتج الأبيض منه ومعه الأزرق والأخضر؛ كما

أنني بخلط الأحمر مع قليل من الأزرق والأخضر وكثير من الأسود أستطيع أن أطابق البني الكلسي بدقة.

"لقد طورت أداتي للنظر في العين. عند وير كلب صغير مثل الكلب العجوز "أسك"، يجلس ساكنًا ويبدو أنه يستمتع بالفحص، وقد حصلت على عدة رجال ذوي حدقات واسعة لا يرغبون أن أختبرهم. لقد رأيت صورة الشمعة بوضوح في كل العيون التي جربتها، وكانت عروق الشبكية مرئية في بعضها؛ لكن عيون الكلاب أظهرت كل تفرعات الأوردة مع شبكات رائعة من الأزرق والأخضر، حتى إنه يمكنك نسخ كل شيء. لقد عرضت على كثير من الرجال صورة الشمعة في عيني أنا، بعد أن حجبت الضوء حتى اتسعت الحدقة، ثم سلطته ثانية.

"أقرأ الآن في الكهرباء وأعمل على حركة الموائع، وقد استنتجت شرطًا يسمح للمائع أن يستمر في الجريان في نفس الاتجاه فترة طويلة دون أن يتعرج".

انعقد اجتماع الجمعية البريطانية في غلاسكو في سبتمبر 1855، وحضر ماكسويل وعرض "قرص الألوان" في بيت البروفيسور رامزي لبعض المهتمين. وفي رسائل إلى والده وصف أحداث الاجتماع وخططه للفصل الدراسي:

"قدّم بروستر ورقة عن "نظرية الألوان الثلاثة في الطيف"، عالج فيها وويول برثاء فلسفي، موصيًا إياه إلى رعاية البروفيسور وارتمن في جنيف، الذي كان يُعتبر أعظم سلطة في مثل هذه الحالات—أي عمى الألوان. كان وويول حاضرًا في الغرفة، لكنه خرج ليتجنب الجدل؛ وأدلى ستوكس بملاحظات قليلة، عرض فيها القضية بوضوح وبأدب.

لكن بروستر لم يفهم أن ستوكس أقرّ بصحة تجاربه، فصورت الصحف ستوكس وكأنه يشكك في دقتها.

"أعمل الآن على ترتيب رياضياتي الكهربائية، وقد أصبحت بعض الأجزاء التي كانت غامضة أوضح؛ لكن لا أجد وقتًا كافيًا لها حاليًا، لأنني أقرأ عن الحرارة والموائع حتى لا أقول شيئًا خاطئًا في محاضراتي. وصلتني مذكرة من جمعية الفنون عن جهاز قياس المسطحات (البلانومتر)، تمنحني شكرًا وتعرض تغطية النفقات حتى 10 جنيهات، شرط تقديم الجهاز في صورة عملية. وعندما أُرتب الفكرة في ذهني، أنوي أن أكتب لجيمس برايسون حولها.

"وصلتني رسالة طويلة من طومسون عن الألوان والكهرباء. بدأ يقتنع بنظريتي عن إمكانية إرجاع جميع الألوان إلى ثلاثة ألوان أساسية، وهو مسرور بأنني دخلت في مجال اهتمامه الكهربائي.

...من الصعب الحفاظ على الاهتمام بالمسائل الفكرية عندما يقل الأصدقاء من النوع الفكري. ومع ذلك، هناك أصدقاء كثيرون غير فكريين يساعدون على إبراز العادات العملية والنشطة للعقل، وهو ما لا يفعله المفرطون في الفكر غالبًا. لذلك، إن كنت سأبقى هذا الفصل، فأنوي أن أوجّه نفسي أكثر نحو العمال الذين ينهضون بإعداد الصفوف، بدلًا من التلاميذ الذين يسببون الإزعاج. وفي الأثناء، هناك الامتحان الذي يجب التفكير فيه.

"تقول إن الدكتور ويلسون أرسل كتابه. سأكتب له شكرًا. أظن أن الكتاب عن عمى الألوان. أنوي أن أبدأ أوراق بواسون في الكهرباء والمغناطيسية غدًا. وقد استعرتهما من المكتبة. أما قراءتي مؤخرًا

فكانت روايات—"شيرلي"، و"العائلات الجديدة"، والآن "غربًا أيها البحر."

"اقترح ماكميلان إعداد كتاب في البصريات بمساعدتي، وأشعر برغبة في ذلك. هناك متاعب كثيرة في إعداد كتاب رياضي، خاصةً في موضوع أنت متمرس به، لأنك عند المراجعة تفعل كما مع التلاميذ—تنظر إن كان المبدأ والنتيجة صحيحين، وتنسى أن تفتش عن الأخطاء الصغيرة أثناء الحل. ومع ذلك، أتوقع أن يكون العمل مفيدًا، بما يتضمنه من جهد شاق، وبما سينالني من انتقادات كثيرة من الأساتذة والطلاب، ومن المؤكد أنه لن يحقق شهرة زائفة إلا في إعلانات ماكميلان. لكن إن كنت قد أدركت الخطة الصحيحة لكتاب تعليمي في البصريات، فسيكون مختلفًا جدًا في الأسلوب، وإن لم يكن في المادة، عن الكتب المستخدمة الآن".

وكان الامتحان المشار إليه هو امتحان الزمالة في "ترينيتي"، وقد انتُخب ماكسويل زميلًا في 10 أكتوبر 1855.

وطُلب منه مباشرة أن يُلقي محاضرات لطلاب الكلية في "الهيدروستاتيكا" و"البصريات" لطلاب السنة الثالثة المتقدمة، وأن يضع أوراق امتحان للدارسين. وبناءً على ذلك، رفض أن يأخذ تلاميذ خصوصيين حتى يتفرغ للقراءة والرياضيات الخاصة، وللجلسات مع الطلاب الذين يحضرون محاضراته.

في نوفمبر كتب ماكسويل:

»لقد ألقيت المحاضرات لمدة أسبوعين حتى الآن، ويبدو أن الصف يتحسن؛ فهم يبدؤون بطرح الأسئلة، وهو أمر جيد. لقد كنت أرسم منحنيات لبيان العلاقة بين الضغط والحجم في الغازات، وهذا جعل الموضوع أسهل«.

ومع ذلك، وجد وقتًا لحضور محاضرات البروفيسور ويليس حول الآليات، وللاستمرار في القراءة. وكتب: «لقد كنت أقرأ كتبًا قديمة عن البصريات، وأجد أن الكثير مما ورد فيها أفضل بكثير من الجديد. إن الرياضيين الأجانب يعيدون اكتشاف طرق كانت معروفة جيدًا في كامبريدج عام 1720، لكنها الآن منسية«.

أما كتاب بواسون فكان يقرأه ليساعده في تكوين آرائه الخاصة حول الكهرباء، والتي كانت تنضج بسرعة. وقد ظهر أول عمل كبير من هذه السلسلة التي غيّرت وجه العلم في 10 ديسمبر 1855، عندما عُرضت ورقته البحثية عن «خطوط فاراداي للقوة» أمام الجمعية الفلسفية في كامبريدج.

في الفصل التالي عاد إلى كامبريدج، منشغلًا بمحاضراته، ومليئًا بخطط عن نموذج جديد لقرص الألوان وغيره. وفي أوائل فبراير تلقى رسالة من البروفيسور فوربس تخبره بأن كرسي الفلسفة الطبيعية في كلية مارشال بأبردين أصبح شاغرًا، مقترحًا أن يتقدم للمنصب.

قرر الترشح إذا وافق والده. وكتب: «أما أنا فأرى أن كلما بدأت عملًا منتظمًا في وقت أبكر كان أفضل، وأفضل وسيلة لذلك أن يعلن المرء استعداده بالتقدم.» وفي 20 فبراير كتب: «على أن الحكمة أنواع كثيرة، ولا أعلم أيها يسكن في قلوب المستشارين أكثر: العلمية، أم

العملية، أم السياسية، أم الكنسية. وقد سمعت أن هناك مرشحين من كل نوع، يعوِّل كل منهم على غلبة نوع معين من الحكمة في تكوين الحكومة«.

وفي ذلك الفصل عُرض الجزء الثاني من ورقته عن «خطوط فاراداي للقوة». وفي رسالة بتاريخ 4 مارس عبّر عن أمله في أن يتمكن قريبًا من كتابة الورقة كاملة: «لم أنجز شيئًا من هذا النوع هذا الفصل، لكني بدأت أشعر من جديد بالحالة الكهربائية«.

كان والده يعمل في إدنبرة لدعم ترشيحه لأبردين، وعندما عاد ماكسويل إلى الشمال في منتصف مارس وجد كل شيء مهيأ. عاد الاثنان معًا إلى غلينلاير بعد بضعة أيام في إدنبرة، وكان ماكسويل يستعد للعودة إلى كامبريدج، لكن في 2 أبريل توفي والده فجأة.

كتب إلى السيدة بلاكبيرن يقول: «توفي والدي فجأة اليوم عند الساعة الثانية عشرة. كان قد أعطى بعض التعليمات بخصوص الحديقة، ثم قال إنه سيجلس ليستريح قليلًا كعادته. وبعد بضع دقائق طلبتُ منه أن يستلقي على الأريكة، ولم يبدُ راغبًا، فأحضرت له بعض الإيثر الذي كان يساعده من قبل. وقبل أن يتناوله أصيب بتشنج خفيف، وانتهى كل شيء. لم يتنفس بعدها إلا قليلًا«.

وبعد هذا بقليل عُيِّن ماكسويل في أبردين. وقد أفسدت وفاة والده بعضًا من أهدافه من التقدم للمنصب؛ فقد كان يعلم أن والده سيسعد برؤيته يشغل كرسيًا في جامعة اسكتلندية، كما كان يأمل أن يعيش معه نصف العام في غلينلاير، لكن لم يكن ذلك ممكنًا. لا شك أن المختبر وحرية البحث، مقارنة بعمل التدريس الروتيني لإعداد الطلاب للامتحانات،

كان لهما جاذبية، لكن من المشكوك فيه إن كانت تلك الخطوة هي الخيار الأنسب له. فالتدريب على أساسيات الفيزياء والميكانيكا لطلاب مبتدئين، كما يقول نيفن في مقدمة الأعمال الكاملة، لم يكن المجال الذي يناسبه، بينما في كامبريدج، لو بقي، لكان دائمًا بين طلابه بعضٌ من أفضل الرياضيين في عصره، وربما أسس قبل خمسة عشر عامًا من ذلك المدرسة الكامبردجية للفيزيائيين التي تفخر اليوم بأنها تنتمي إليه.

كانت لحظة الوداع في ترينيتي صعبة. فكتب في 4 يونيو إلى السيد ر. ب. ليتشفيلد:

»مساء الخميس سأسلك طريق الشمال الغربي إلى الشمال. أنا مشغول الآن بفرز أكوام هائلة من الأوراق لأجد ما لا يجب أن يُحرق وسط كثير من المواد القابلة للاشتعال، وبعضها لين يصلح للتعبئة. ليس من السهل أن أنزل لأعيش وحيدًا، لكنه ليس مريحًا أيضًا أن أبقى هنا، بينما كل ما عليّ أن أفعله صار في مكان آخر. لا بد أن تأتي في النهاية مرحلة الانتقال من رجل إلى "دون"، ويجب أن تكون مؤلمة، مثل اقتلاع الأعصاب تدريجيًا. وحين تنتهي لا يبقى ألم، إلا ومضات تذكير من بعض الجذور أو البقايا، لتدل على ما كان موجودًا وما كان يمكن أن يكون«.

قضى صيف 1856 في غلينلاير، حيث استضاف عددًا من أصدقائه مثل لشنغتون، ماكلينان، وابني عمته كاي. وواصل عمله في البصريات والكهرباء والمغناطيسية. وفي أكتوبر كان منشغلًا بإعداد «خطاب رسمي أو بيان إلى فلاسفة الطبيعة في الشمال»، وكان يحتاج

إلى القهوة، والأنشوجة، ونار متقدة، ومعطف مرفوع الذيل، ليشعر بطبيعته. وكان ذلك خطابه الافتتاحي.

في نوفمبر انتقل إلى أبردين. وتحدثت رسائله إلى الآنسة كاي والبروفيسور كامبل وسي. جي. مونرو عن أعمال الفصل الدراسي. وآخرها من غليناير بتاريخ 20 مايو 1857، بعد انتهاء العمل: »سار الفصل بسلاسة. أنجزت موضوع الشمس، وكل بداية البصريات، وأتممت الجزء التجريبي حتى خطوط فراونهوفر، التي كانت رائعة عند رؤيتها بواسطة منشور مائي وضعته في صندوق مكعب طوله خمس بوصات...

نجحت جدًا في موضوع الحرارة. جاءت تجارب الحرارة الكامنة دقيقة للغاية. كان ذلك جزءي، واستطاع الطلاب شرح النتائج وحلها أفضل مما توقعت. في العام القادم أنوي أن أخلط الفيزياء التجريبية بالميكانيكا، مخصصًا الثلاثاء والخميس (ماذا سيقول ستوكس؟) لعلم التجريب الدقيق...

في الأسبوع الماضي حضرتُ كلوروفيل (كما يسميه الكيميائيون)، سائلاً أخضر يحوِّل الضوء غير المرئي إلى أحمر... أما آخر ما أنجزته فكان تسوية معادلات الألوان التي وضعتها العام الماضي. وكانت النتيجة مرضية للغاية«.

وفي رسالة أخرى بتاريخ 5 يونيو 1857 إلى مونرو، علّق على عمل لجنة الجامعة والأنظمة الجديدة...

لقد ابتكر نموذجًا (ما زال محفوظًا في مختبر كافنديش) لعرض حركات الأقمار في حلقة مضطربة، وذلك "لتنوير عبدة الصور ذوي الحس السليم."

وقد مُنحت مقالته الجائزة، ونال مؤلفها تقديرًا كبيرًا بين العلماء.

وفي رسالة أخرى، كتبها في نفس الفصل الدراسي، قال:

"أجد أن عملي الأساسي هنا هو تعليم طلابي أن يتجنبوا التعابير الغامضة، مثل: 'قوة معينة' أي غير مؤكدة، واستخدام *قد* بدلًا من *لا بد*، و*سوف يكون* بدلًا من *هو*، و*يتناسب مع* بدلًا من *يساوي*."

وكانت وفاة صديقه الجامعي "بوميروي" في الهند بسبب الحمى في الخريف، صدمة كبيرة له؛ إذ تُظهر رسائله في تلك الفترة عمق مشاعره ومعتقداته.

أما مسألة دمج الكليتين في أبردين، كلية الملك وكلية المارشال، فقد بدأت تطفو على السطح. فكتب في رسالة إلى البروفيسور كامبل: "ليعلم الجميع أنني مؤيد للاندماج."

وفي فبراير 1858، كان ما يزال منشغلًا بدراسة حلقات زحل، بينما كان منهمكًا في الوقت ذاته في التدريس لطلابه. فقد أنشأ فصلًا اختياريًا لطلابه من العام السابق، وقرأ معهم كتاب نيوتن عن "النظرية القمرية والفلك". وتبع ذلك دراسة "الكهرباء والمغناطيسية"، حيث كان كتاب فاراداي هو الأساس في كل شيء، "إذ هو نفسه نواة كل ما هو كهربائي منذ عام 1830."

وفي فبراير 1858 أيضًا، أعلن خطبته على "كاثرين ماري ديوار"، ابنة مدير كلية المارشال.

وكتب إلى عمته في 18 فبراير 1858:

"عزيزتي العمة، هذه الرسالة لتخبرك أنني سأكون على وشك الزواج...
لا تقلقي؛ فهي ليست رياضية، لكن هناك أشياء أخرى غير ذلك، وهي بالتأكيد لن توقف الرياضيات. الشاهد الوحيد العياني هو 'جوني'، وقد رآها فقط عندما كنا نحاول أن نتظاهر بعدم الاهتمام. لقد حاولنا الاستمرار في ذلك لاحقًا، لكنه لم ينجح، ولم يكن جيدًا لأي منا."

وأقيم الزفاف في أوائل يونيو. وقد حفظ البروفيسور كامبل بعض الرسائل التي كتبها ماكسويل إلى الآنسة ديوار، وتحتوي هذه الرسائل على "سجل لمشاعر تحولت، في السنوات التالية، إلى أفعال، وتجسدت في حياة زوجية لا يمكن وصفها إلا بأنها مثال فريد في الإخلاص."

أما مشروع دمج الكليتين الذي أشرنا إليه، فقد استمر حتى اكتمل عام 1860.
وقد توحدت الكليتان لتشكلا "جامعة أبردين"، وأنشئت بموجب ذلك كرسي جديد للفلسفة الطبيعية، تولاه "ديفيد تومسون"، أستاذ الفلسفة الطبيعية في كلية الملك، والأكبر سنًا من ماكسويل.

ويكتب السيد "و. د. نيفين" في مقدمته لأعمال ماكسويل حول هذا التعيين:
"على الرغم من أن البروفيسور تومسون لم يكن في منزلة ماكسويل

كفيزيائي، إلا أنه كان رجلًا متميزًا بقوة شخصيته الفريدة وبقدراته الإدارية الكبيرة، وكان له دور بارز في تحقيق دمج الكليتين. كما كان محاضرًا ومعلمًا بارعًا، وأسهم كثيرًا في رفع مستوى التعليم العلمي في شمال اسكتلندا. وهكذا، فإن الاختيار الذي اتخذه المفوضون، على الرغم من كونه شبه حتمي، أعطى انطباعًا بأن ماكسويل قد فشل كمعلم. غير أنه لا يبدو أن هناك دليلًا يدعم مثل هذا الاستنتاج. بل على العكس، إذا حكمنا من خلال عدد الطلاب المتطوعين الذين حضروا دروسه في آخر عام دراسي له في الكلية، فسيبدو أنه كان محبوبًا كأستاذ بقدر ما كان محل تقدير على المستوى الشخصي."

وقد أُثير أحيانًا التساؤل عمّا إذا كان ماكسويل معلمًا عظيمًا. وأثق أن الصفحات التالية ستقدم الإجابة. فلم يكن محاضرًا لامعًا. وكما يقول البروفيسور كامبل:

"بين جهل طلابه الواسع ومعرفته الهائلة، كان من الصعب العثور على أرضية مشتركة. والنصيحة التي أسداها مرةً لصديق كان عليه أن يعظ جماعة ريفية، 'لماذا لا تُخفف لهم الأمر قليلًا؟'، كانت تنطبق عليه غالبًا. لقد كان يكثر من الأمثلة التي تفسر المجهول بمجهول آخر، أو التي توضح العويص من خلال خاصية غير ملحوظة لشيء مألوف، بسرعة مذهلة. ثم إن روح المواربة والمفارقة، رغم وعيه بمخاطرها، كانت كثيرًا ما تسيطر عليه ضد رغبته، سواء من الخجل أو الانفعال اللحظي أو يأسه من إيصال فكرته، فتقوده إلى 'عبارات فوضوية' تنتهي بمزحة ساخرة أو دعابة لاذعة."

لكن التدريس لا يتم كله بالمحاضرات. فكتبه وأوراقه العلمية تمثل كنوزًا هائلة من الأفكار والاقتراحات التي ظل ألمع العقول على مدى العشرين عامًا الماضية يطورونها. ولقد كان الحديث معه لساعة واحدة كفيلًا بإلهام عمل لعام كامل؛ ورؤية حماسه أو نيل كلماته المشجعة كانت كافية لتعويض سنوات من الجهد المضني أمام جهاز معاند يرفض أن يعمل كما يجب، أو أمام خطأ صغير مستعصي على الحساب. وسوف يُثبت حكم التاريخ بلا شك أن كليرك ماكسويل كان معلمًا عظيمًا، رغم أن إلقاء المحاضرات على حشد من طلاب البكالوريوس غير المدربين كان مهمة أنسب لغيره منه.

الفصل الرابع

أستاذ في كلية كينغز بلندن – الحياة في غلينلاير

في عام 1860 استقال "فوربس" من كرسي الفلسفة الطبيعية في إدنبرة. وكان ماكسويل و"تيت" مرشحين، فنال تيت المنصب. وفي صيف نفس العام حصل ماكسويل على أستاذية الفلسفة الطبيعية الشاغرة في كلية كينغز بلندن. وقد شغلها حتى عام 1865، وتميزت هذه الفترة من حياته بظهور بعض من أهم أبحاثه. كان العمل شاقًا؛ إذ امتد البرنامج الدراسي بالكلية على مدى تسعة أشهر في السنة، بالإضافة إلى محاضرات مسائية للعمال ضمن واجباته النظامية. وقد أفادته إقامته في لندن بما أتاحته له من فرص للتعرف شخصيًا على فاراداي وغيره، كما جدد صداقاته مع عدد من زملائه القدامى في كامبريدج.

كان حاضرًا في الاجتماع الشهير للجمعية البريطانية في أكسفورد عام 1860، حيث عرض صندوق الألوان الذي ابتكره لمزج ألوان الطيف. وكان قد قدّم في اجتماع أبردين عام 1859 أول بحث له عن "النظرية الديناميكية للغازات"، ونُشر في *المجلة الفلسفية* في يناير 1860. أما الجزء الثاني من البحث، الذي تناول التوصيل الحراري وغيرها من الظواهر في الغاز، فقد نُشر في يوليو 1860 بعد اجتماع أكسفورد.

وفي يناير 1860، قدم البروفيسور ستوكس للجمعية الملكية ورقة بعنوان "نظرية الألوان المركبة"، تضمنت وصف صندوق الألوان

بصورته النهائية (وما تزال معظم أجزائه المهمة محفوظة في مختبر كافنديش)، إضافة إلى عدد من الملاحظات التي قام بها ماكسويل وزوجته، سيُذكر المزيد عنها لاحقًا.

وفي نوفمبر 1860، نال عن هذا العمل "ميدالية رمفورد" من الجمعية الملكية.

أما عام 1861 فقد كان ذا أهمية عظيمة في تاريخ العلم الكهربائي. إذ اجتمعت الجمعية البريطانية في مانشستر، وشُكلت لجنة لوضع معايير لمقاومة الكهرباء. لم يكن ماكسويل عضوًا في البداية. وقد رفعت اللجنة تقريرها في اجتماع كامبريدج عام 1862، وأعيد تشكيلها مع توسيع مهامها، وأضيف اسم ماكسويل مع آخرين إليها، فشارك بفاعلية كبيرة في مداولاتها. وجاء في تقريرها المقدم عام 1863 أنها توصلت، "بعد دراسة متأنية، إلى أن نظام الوحدات الكهربائية المطلقة، القائم على قياسات ميكانيكية بحتة، ليس فقط أفضل نظام طُرح حتى الآن، بل هو النظام الوحيد المتسق مع معرفتنا الحالية بالعلاقات بين الظواهر الكهربائية المختلفة، وبالصلة بينها وبين القياسات الأساسية للزمن والمسافة والكتلة."

وقد حمل الملحق (ج) من التقرير عنوان "العلاقات الأولية بين القياسات الكهربائية"، ووقع عليه ماكسويل و"فليمنغ جينكن"، وهو الأساس لكل ما جرى لاحقًا في ميدان القياس الكهربائي المطلق. أما الملحق (د) فقد تضمن وصفًا للتجارب حول الوحدة المطلقة للمقاومة الكهربائية، أجراها ماكسويل مع جينكن و"بالفور ستيوارت" في مختبر كلية كينغز. ووُصفت تجارب إضافية في تقرير عام 1864. وقد تُوج

هذا العمل في عام 1894 حين جرى إقرار نظام وحدات كهربائية عالميًا استنادًا إلى ما ورد في هذه التقارير.

وفي هذه الأثناء، كانت آراء ماكسويل في النظرية الكهرومغناطيسية تتطور بهدوء. فقد ظهرت مقالاته عن "الخطوط الفيزيائية للقوة" في *المجلة الفلسفية* خلال عامي 1861 و1862، وكانت تحمل بذور نظريته – وإن صيغت آنذاك في صورة مادية نوعًا ما. وفي الورقة المنشورة في يناير 1862، أرسى العلاقة الشهيرة بين نسبة الوحدات الكهربائية وسرعة الضوء. وقد تناولت مراسلاته مع فليمنغ جينكن و"سي. ج. مونرو" في تلك الفترة جانبًا من التحقق التجريبي لهذه العلاقة. ونُشرت تجاربه حول الموضوع في *المعاملات الفلسفية* عام 1868.

وقد شغلت هذه النظرية الكهربائية ذهنه بصورة رئيسية خلال عامي 1863 و1864. وفي سبتمبر من العام الأخير كتب من غلينلاير إلى "سي. هوكين"، الذي خلف بلفور ستيوارت أثناء السلسلة الثانية من التجارب على قياس المقاومة:

"لقد أنجزت عدة مسائل كهربائية. لدي الآن نظرية عن (الامتصاص الكهربائي)، أي الشحنة المتبقية، إلخ. وأرغب بشدة في تحديد الحث النوعي والمقاومة والامتصاص في عوازل جيدة مثل الزجاج واللاكّ والجاتا بيركا والإيبونيت والكبريت وغيرها. كما أنني قد خلّصت النظرية الكهرومغناطيسية للضوء من كل الافتراضات غير المبررة، بحيث يمكننا بأمان أن نحدد سرعة الضوء

بقياس قوة التجاذب بين أجسام محفوظة عند فرق جهد معروف مقاس بوحدات كهرومغناطيسية.

آمل أن تكون هناك ملفات مقاومة في اجتماع الجمعية البريطانية".

وقد أسفر هذا العمل عن أعظم أبحاثه الكهربائية: "نظرية ديناميكية للمجال الكهرومغناطيسي"، الذي ألقاه على الجمعية الملكية في 8 ديسمبر 1864.

لكن نظرية الغازات الجزيئية بقيت أيضًا حاضرة في ذهنه. ففي عام 1862 كتب إلى "هـ. ر. دروب:"

"منذ زمن، أثناء دراستي لنظرية برنولي عن الغازات، فوجئت بأن الاحتكاك الداخلي للغاز (إن كان يعتمد على تصادم الجسيمات) ينبغي أن يكون مستقلاً عن الكثافة.

وقد فحص ستوكس تجارب غراهام على معدل تدفق الغازات في الأنابيب الدقيقة، فوجد أن الاحتكاك إذا كان مستقلاً عن الكثافة يفسر نتائج غراهام، أما إذا اعتُبر متناسبًا مع الكثافة، فقد اختلفت النتائج كثيرًا. وهذا يبدو أمرًا مثيرًا، وظاهرة إضافية يفسرها (تصادم الجسيمات). لكن ما يزال هناك أمر يخالف النظرية، وهو نسبة الحرارة النوعية عند ضغط ثابت إلى الحرارة النوعية عند حجم ثابت، التي في الهواء = 1.408، بينما ينبغي أن تكون 1.333".

وفي 21 أبريل 1862 كتب إلى لويس كامبل:

"العالِم كلاوزيوس من زيورخ، أحد فلاسفة الحرارة، يعمل على نظرية الغازات باعتبارها أجسامًا صغيرة تتحرك في كل اتجاه، وقد وجد بعض الحالات التي لا تتفق نتائجه معي. لذلك أعيد العمل عليها من جديد. وقد ظهرت نتائج تجريبية مؤخرًا تؤيد هذه النظرية أكثر مما تنقضها.
آمل أن تستمتع بغياب الطلاب. أجد أن تقسيمهم إلى صفوف أصغر يساعدني ويساعدهم، لكن نسيانهم تمامًا لفترات محددة شرط ضروري لإنصافهم في الوقت المناسب".

وقد جاءت تجاربه عن لزوجة الغازات، التي شكلت محاضرته "الباكيرية" أمام الجمعية الملكية في 8 فبراير 1866، ثمرة لهذا العمل. وكان منزله في 8 "بالاس غاردنز" بكينسنغتون يحوي علية كبيرة ممتدة على طوله.

"وللحفاظ على درجة الحرارة المناسبة، أشعلت نار كبيرة لعدة أيام وسط طقس شديد الحر، وأبقيت غلايات فوقها لتصاعد كميات ضخمة من البخار داخل الغرفة. وقد تولت السيدة ماكسويل مهمة (مُشعلة النار)، وكان عملًا مرهقًا للغاية حين استمر لساعات طويلة متواصلة. وبعد ذلك حُفظت الغرفة باردة للتجارب التالية باستخدام كميات كبيرة من الثلج".

وفي مايو 1866، قرأ بحثه عن "النظرية الديناميكية للغازات"، حيث صحح الأخطاء في أبحاثه السابقة التي أشار إليها كلاوزيوس.

وبحلول نهاية عام 1865، كان قد استقال من منصبه في لندن، وخلفه البروفيسور "و. ج. آدامز". وقضى السنوات الأربع التالية في غلينلاير، يعمل على نظريته في الكهرباء، ويزور أحيانًا لندن وكامبريدج، ويشارك بفاعلية في شؤون منطقته. وفي 1865 ألم به مرض خطير، اعتنت به زوجته خلاله بعناية كبيرة.

كانت مراسلاته كثيرة وتشغل معظم وقته، كما انصرف كثيرًا إلى دراسة الأدب الإنجليزي، وكان يستمتع بقراءة تشوسر أو ملتون أو شكسبير بصوت عالٍ لزوجته. وقرأ كذلك كتبًا كثيرة في اللاهوت والفلسفة، ولم يزد ما قرأه إلا ترسيخًا لإيمانه الراسخ بأساسيات المسيحية التي عاش عليها ومات.

وفي 1867، زار هو وزوجته إيطاليا، وكانت الرحلة مصدر سعادة كبيرة لهما معًا.

أما عمله العلمي الأبرز فكان التحضير لكتابه "الكهرباء والمغناطيسية"، الذي لم يصدر حتى عام 1873. وكانت تلك الفترة في مجملها وقتًا للتأمل الهادئ والاستعداد لمهمته الكبرى التالية: تأسيس مدرسة الفيزياء في كامبريدج.

وفي عام 1868، خلا منصب رئاسة الكلية المتحدة في جامعة سانت أندروز باستقالة فوربس، ودُعي ماكسويل من قبل عدد من الأساتذة للترشح. لكنه رفض أن يرفع اسمه إلى التاج.

الفصل الخامس

كامبريدج ـــ أستاذ الفيزياء

خلال فترة اعتزاله في "غلينلير" بين عامي 1865 و1870، كان ماكسويل يتردد كثيرًا على كامبريدج. فقد شارك كممتحن في اختبارات الـ Tripos الرياضية في أعوام 1866 و1867، ثم مرة أخرى في 1869 و1870.

كانت اللوائح الخاصة بالـ Tripos قد وُضعت منذ عام 1848، وظلت دون تغيير يُذكر، لكن كثيرين رأوا أن نطاق المواد لم يكن واسعًا بما يكفي، وأن إصلاحًا ضروريًا مطلوب للحفاظ على مكانة كامبريدج كمركز للتعليم الرياضي. فـ "الفلسفة الطبيعية" كانت مذكورة ضمن المنهج، لكنها اقتصرت على الميكانيكا السماوية (الحركية والفلك)، علم السوائل الساكنة، والبصريات الفيزيائية، مع شيء يسير من الهيدروديناميكا والصوت.

أما موضوعات مثل الحرارة، الكهرباء والمغناطيسية، نظرية الأجسام المرنة والاهتزازات، وحركة الدوامات في السوائل، فلم تكن موجودة تقريبًا عام 1848؛ وقد أسسها ستوكس، طومسون، وماكسويل في إنجلترا، وهلمهولتز في ألمانيا.

لذلك، في يونيو 1868، أقر مجلس الجامعة خطة جديدة للامتحانات تدخل حيز التنفيذ في يناير 1873، حيث أُدرجت هذه الموضوعات بشكل صريح.

كتب السيد نيفن، أحد الذين امتحنهم ماكسويل عام 1866، في مقدمة الأعمال الكاملة لماكسويل:

"لسنوات قبل 1866، حين عاد ماكسويل إلى كامبريدج بصفته مشرفًا على الـTripos ، كانت الدراسات الجامعية قد فقدت اتصالها بالحركات العلمية الكبرى الجارية خارج أسوارها. وقد قيل إن بعض المواد الأكثر تداولًا لم تعد تثير اهتمام هذا الجيل، وبدأت تتعالى الشكاوى بأن موضوعات مثل الحرارة والكهرباء والمغناطيسية مستبعدة من الامتحانات، بينما يُهدر الطلاب وقتهم وجهدهم في تفاهات رياضية عقيمة لا قيمة علمية أو عملية لها.
دخل ماكسويل حركة الإصلاح بحماس. ومن خلال أسئلته عام 1866 وما بعدها، ضخ دمًا جديدًا في الامتحانات، وأسهم بقوة في صياغة النظام الجديد عام 1873. لكن الأثر الأكبر جاء من كتاباته، حيث أثرت بعمق في الأعضاء الأصغر سنًا بالجامعة، وكان له دور حاسم في تحقيق هذا التغيير".

لكن المشكلة أن الجامعة لم تكن تملك وسائل لتدريس هذه العلوم، لذا عُينت لجنة (Syndicate) في 25 نوفمبر 1868 "لتبحث أفضل السبل لتعليم الطلاب الفيزياء، خصوصًا الحرارة والكهرباء والمغناطيسية، وتوفير الأجهزة اللازمة لذلك".

شارك في هذه اللجنة شخصيات بارزة مثل: الدكتور كوكسون (عميد كلية سانت بيترز)، البروفيسور ستوكس، البروفيسور لايفنغ، البروفيسور همفري، الدكتور فير، والدكتور روث. وكان ماكسويل في كامبريدج حينها ممتحنًا في الـTripos ، وقد ساعدت خبرته السابقة كممتحن ومشرف في إظهار الحاجة الملحة للإصلاح.

قدمت اللجنة تقريرها في 27 فبراير 1869، استندت فيه إلى تقرير لجنة ملكية سابقة عام 1850، التي أوصت بضرورة تطوير تدريس الفيزياء التجريبية في الجامعة. وأكد التقرير الجديد أن إدراج موضوعات مثل الحرارة والكهرباء والمغناطيسية في الامتحانات يستلزم بالضرورة توفير تعليم منظم وتجارب عملية، واقترح تأسيس كرسي جديد لأستاذية الفيزياء التجريبية، على أن ينتهي بوفاة أول من يشغله. كما أوصى بإنشاء مختبر مجهز وأجهزة بتكلفة تُقدر بنحو 6300 جنيه إسترليني، مع تعيين مساعد ومعلم عملي.

لكن مسألة التمويل واجهت صعوبات، إذ رفضت الكليات المساهمة من أموالها المؤسسية. وهنا ظهر الحل من الخارج؛ ففي أكتوبر 1870، قدّم دوق ديفونشاير، مستشار الجامعة ورئيس لجنة التعليم العلمي، عرضًا سخيًا بتحمل كامل تكلفة المبنى والأجهزة.

وبهذا، تأسست أستاذية الفيزياء التجريبية رسميًا في 9 فبراير 1871، وحدد يوم 8 مارس موعدًا للانتخاب.

أما مسألة اختيار الأستاذ، فقد طُرح اسم السير وليم طومسون (اللورد كلفن)، لكنه رفض المنصب. فتوجهت الأنظار إلى ماكسويل، الذي كان مترددًا في البداية بترك غلينلير، لكن ضغط أصدقائه وزملائه مثل

البروفيسور ستوكس، واللورد رايلي (جون سترَت)، دفعه إلى التفكير بالأمر بجدية.

وبالفعل، في 24 فبراير 1871، أعلن رسميًا ترشحه للمنصب، تحت الاسم:
جون (بالخطأ) كليرك ماكسويل، زميل الجمعية الملكية، وأستاذ الفلسفة الطبيعية سابقًا في أبردين وكلية كينغز بلندن، كمرشح لمنصب أستاذ الفيزياء التجريبية.

ماكسويل انتُخب دون معارضة. وقد كتب إلى زوجته من كامبريدج بتاريخ 20 مارس 1871 يقول:

"هناك جماعتان بشأن الأستاذية: إحداهما تريد محاضرات شعبية، والأخرى تهتم أكثر بالعمل التجريبي. أعتقد أنه يجب أن تكون هناك درجات متتالية: محاضرات شعبية وتجارب بسيطة للعامة؛ تجارب حقيقية للطلاب الحقيقيين؛ وتجارب شاقة ومضنية للرجال المتميزين أمثال تروتر، وستيوارت، وسترَت".

وفي رسالة من غلينلير إلى سي. ج. مونرو بتاريخ 15 مارس 1871 كتب:

"الفيزياء التجريبية في كامبريدج لم تُبنَ بعد، لكننا سنحاول. المطلوب هو أن نضع أستاذًا وطالبًا مبتدئًا معًا ليراقبا ويسجلا (مثلاً) اهتزازات مغناطيس، أو أن يقوم الأستاذ بتدوير ساعة ويقوم الطالب بمراقبته وضبطه".

وفي أكتوبر ألقى ماكسويل محاضرته الافتتاحية. وبعض الاقتباسات التالية تُظهر الروح التي اقترب بها من مهمته:

"في دورة للفيزياء التجريبية يمكننا أن نعتبر إما الفيزياء أو التجارب هي العنصر الأساسي. يمكننا أن نستخدم التجارب لتوضيح ظواهر فرع معين من الفيزياء، أو نقوم ببحث علمي فيزيائي بهدف توضيح طريقة تجريبية معينة. وبحسب الترتيب الزمني، ينبغي أن نبدأ في قاعة المحاضرات بسلسلة من المحاضرات حول فرع من الفيزياء مدعومة بتجارب توضيحية، ونختم، في المختبر، بسلسلة من التجارب البحثية.

دعوني أقول بضع كلمات عن هذين النوعين من التجارب: تجارب التوضيح وتجارب البحث. إن هدف تجربة التوضيح هو أن تُلقي الضوء على فكرة علمية بحيث يتمكن الطالب من استيعابها. وتُرتب ظروف التجربة بحيث يُجعل الظاهرة التي نريد ملاحظتها أو عرضها بارزة، بدلاً من أن تكون محجوبة ومتشابكة مع ظواهر أخرى، كما يحدث عندما تظهر في السياق الطبيعي للأشياء. إن عرض التجارب التوضيحية، وتشجيع الآخرين على إجرائها، وتنمية الأفكار التي تسلط هذه التجارب الضوء عليها بكل وسيلة، يُشكّل جزءًا مهمًا من واجبنا. وكلما كانت مواد التجربة التوضيحية أبسط وأكثر ألفة للطالب، كان أقدر على اكتساب الفكرة التي يُراد توضيحها. إن القيمة التعليمية لمثل هذه التجارب تكون غالبًا عكسية معقدة الجهاز. فالطالب الذي يستخدم أجهزة منزلية الصنع، والتي غالبًا ما تتعطل، يتعلم في كثير من الأحيان أكثر من الطالب الذي يستخدم أجهزة دقيقة الضبط، يميل إلى الوثوق بها، ولا يجرؤ على تفكيكها.

من الضروري جدًا أن يُتاح لأولئك الذين يحاولون التعلم من الكتب فقط، التعرف على الحقائق العلمية عبر بضع تجارب توضيحية، حتى يستطيعوا التعرف عليها عندما يواجهونها في الطبيعة. إن للعلم وجهًا مختلفًا تمامًا في نظرنا بعد أن نكتشف أنه ليس في قاعات المحاضرات فقط، ولا بواسطة الضوء الكهربائي المسلط على شاشة، يمكننا أن نشاهد الظواهر الفيزيائية، بل إننا نجد أمثلة على أعظم مبادئ العلم في الألعاب والرياضة البدنية، وفي السفر برًا وبحرًا، وفي عواصف الهواء والبحر، وأينما وُجدت المادة في حالة حركة.

فإذا أردنا، لمصلحتنا الخاصة ولشرف جامعتنا، أن ينجح مختبر ديفونشاير، فعلينا أن نسعى إلى الحفاظ على ارتباط حي بينه وبين بقية الكليات والتخصصات في جامعتنا. ولهذا سننظر أولاً في العلاقة التي نقف فيها تجاه الدراسات الرياضية التي ازدهرت بيننا منذ زمن طويل، والتي تتناول موضوعاتنا ذاتها، والتي تختلف عن دراساتنا التجريبية فقط في الطريقة التي تُعرض بها على العقل.

ليس هناك وسيلة أقوى لإدخال المعرفة إلى العقل من تقديمها بطرق متعددة قدر الإمكان. فعندما تدخل الأفكار عبر بوابات مختلفة وتلتقي في حصن العقل، فإن الموقع الذي تحتله يصبح حصينًا لا يُقهر. يخبرنا خبراء البصريات أن الجمع الذهني بين الصور التي نحصل عليها من موقعين لا يفصل بينهما أكثر من بعد أعيننا يكفي ليعطينا انطباعًا بصلابة الجسم المرئي، ونجد أن هذا الانطباع يتشكل حتى عندما نعلم أننا ننظر فقط إلى صورتين مسطحتين موضوعتين في جهاز المجسم (الستريوسكوب). ومن الطبيعي إذن أن نتوقع أن المعرفة بالعلوم الفيزيائية التي تُكتسب من خلال الاستخدام المتكامل للتحليل الرياضي

والبحث التجريبي ستكون أكثر صلابة ونفعًا واستمرارية من تلك التي يمتلكها الرياضي البحت أو المجرب البحت.

ولكن ما تأثير ذلك على الجامعة إذا انصرف الرجال، الذين يتبعون مسار القراءة الذي أنتج لنا العديد من علماء الرياضيات المرموقين، إلى القيام بالتجارب؟ ألا يُعتبر حضورهم في المختبر مضيعة للوقت من دراساتهم الأهم، بل وإدخال عنصر مشوش، يُلوّث تصوراتهم الرياضية بصور مادية، ويقوّض ثقتهم في صيغ الكتب؟ هذا بالإضافة إلى أننا قد سمعنا بالفعل شكاوى من التوسع المفرط في دراساتنا، ومن الضغط الشديد الواقع على طلابنا بفعل ثقل المعرفة التي يحاولون حملها معهم إلى قاعة الامتحان. فإذا طلبنا منهم الآن أن يدرسوا موضوعاتهم ليس فقط بالكتب والكتابة، بل أيضًا بالملاحظة والممارسة العملية، ألا ينهارون تمامًا؟ قد يُقال إن المختبر الفيزيائي ربما يكون مفيدًا لأولئك الذين يتخرجون في العلوم الطبيعية ولا يدرسون الرياضيات، لكن محاولة الجمع بين النوعين من الدراسة أثناء فترة الإقامة في الجامعة أمر يفوق طاقة أي عقل واحد.

لا شك أن لهذا الرأي بعض الوجاهة. فالكثير منا قد تجاوز بالفعل صعوبات التدريب الرياضي الأولية. وعندما نواصل دراستنا الآن نشعر بأنها تتطلب جهدًا وتنطوي على إرهاق، لكننا واثقون أنه إذا عملنا بجد فإن تقدمنا سيكون مؤكدًا.

أما بعضنا الآخر فقد يكون لديه خبرة ما بروتين العمل التجريبي. فبمجرد أن نتعلم قراءة المقاييس، وملاحظة الأزمنة، وضبط المناظير،

وما إلى ذلك، يتوقف هذا النوع من العمل عن احتياج جهد عقلي كبير. قد نُرهق أعيننا ونتعب ظهورنا، لكننا لا نُرهق عقولنا كثيرًا.

لكننا لا نشعر بالأثر الكامل لما أسماه فاراداي "القصور العقلي" إلا عندما نحاول ربط الجانب النظري من تدريبنا بالجانب العملي: ليس فقط صعوبة التعرف، بين الأشياء الملموسة أمامنا، على العلاقات المجردة التي تعلمناها من الكتب، بل الألم المشتت الناتج عن اقتلاع العقل من الرموز إلى الأشياء، ومن الأشياء مرة أخرى إلى الرموز. غير أن هذا هو الثمن الذي ندفعه من أجل أفكار جديدة.

ولكن عندما نتغلب على هذه الصعوبات، ونعبر بنجاح الهوة بين المجرد والمحسوس، فإننا لا نحصل على مجرد معلومة، بل نكتسب بذرة ملكة عقلية دائمة. وعندما نُكرر جهودًا من هذا النوع مرارًا، وننمي الملكة العلمية بشكل أوسع، يصبح توظيف هذه الملكة في اكتشاف المبادئ العلمية في الطبيعة، وفي توجيه الممارسة بواسطة النظرية، ليس عبئًا بل مصدرًا لا ينضب من المتعة، نعود إليه مرارًا حتى تبدأ حتى أفكارنا العارضة في الجريان ضمن قناة علمية.

لكن عملنا الأساسي في المختبر يجب أن يكون هو التعرف على كل أنواع الطرق العلمية، ومقارنتها وتقدير قيمتها. وسيكون، في رأيي، إنجازًا جديرًا بجامعتنا، وأكثر احتمالاً أن يتحقق هنا مقارنة بأي مختبر خاص، إذا نجحنا من خلال النقاش الحر والكامل لقيمة مختلف الإجراءات العلمية، في تكوين مدرسة للنقد العلمي، والمساهمة في تطوير مبدأ "المنهج."

ومع ذلك، وحتى ونحن نُقر بأن المعرفة العملية بطرق العلوم الفيزيائية جزء أساسي من التعليم الرياضي والعلمي، قد يُسأل عما إذا كنا لا نعطي للعلم أهمية مبالغًا فيها كجزء من التعليم الليبرالي.

ولحسن الحظ، لا يوجد هنا سؤال عما إذا كان ينبغي للجامعة أن تظل مكانًا للتعليم الليبرالي، أو أن تكرّس نفسها لإعداد الشباب لمهن معينة. وبالتالي، ورغم أن بعضنا قد يرى، كما آمل، أن يجعل pursuit العلم المهمة الأساسية في حياته، فإنه يجب أن يكون أحد أهدافنا الثابتة أن نحافظ على صلة حية بين عملنا وبين الدراسات الليبرالية الأخرى في كامبريدج، سواء كانت أدبية أو لغوية أو تاريخية أو فلسفية.

هناك روح مهنية ضيقة قد تنشأ بين العلماء كما تنشأ بين الرجال الذين يمارسون أي عمل متخصص آخر. لكن الجامعة بالتأكيد هي المكان الذي ينبغي أن نكون قادرين فيه على التغلب على هذا الميل لأن يتحول الناس، وكأنهم حُبيبات صغيرة، إلى عوالم صغيرة، وكلما صغُرت صارت أكثر دنيوية! نحن نفقد ميزة جمع رجال ذوي اهتمامات متنوعة في هيئة واحدة إذا لم نسعَ لامتصاص شيء من روح أولئك الذين يختلف مجال تعلمهم الخاص عن مجالنا".

تعبير آخر عن آرائه حول مكانة الفيزياء في ذلك الوقت يمكن العثور عليه في خطابه أمام القسم (أ) من الجمعية البريطانية عندما كان رئيسًا في اجتماع ليفربول عام 1870.

الفصل السادس

كامبريدج – معمل كافندش

لكن المعمل لم يكن قد بُني بعد. فقد عُيّنت لجنة، كان ماكسويل أحد أعضائها، للنظر في مسألة اختيار الموقع، واستشارة أهل الخبرة، والحصول على الرسومات والتقديرات. وقد زار الأستاذ ماكسويل والسيد تروتر عدة معامل داخل البلاد وخارجها بغرض الاطلاع على أفضل الترتيبات. وعُيّن السيد و. م. فوسيت مهندسًا معماريًا؛ وقُبل عرض السيد جون لوفداي من "كيبورث" لبناء المعمل بتكلفة 8,450 جنيهًا إسترلينيًا (من دون حساب الغاز والمياه والتدفئة) في مارس 1872، وبدأ البناء في الصيف.

وفي هذه الأثناء، بدأ ماكسويل بإلقاء المحاضرات، وكان يجد لنفسه مسكنًا أينما تيسّر. كتب من "غِلنلير" بتاريخ 19 أكتوبر 1872:

"المحاضرات تبدأ يوم 24... أسمع أن المعمل ينهض، لكن ليست لدي منصة أضع عليها كُرسيّ، فأتنقل مثل طائر الوقواق، أضع أفكاري في قاعة الكيمياء في الفصل الأول، ثم في قاعة علم النبات في الصوم الكبير، ثم في قاعة التشريح المقارن في عيد الفصح."

ولم يكتمل البناء إلا في يونيو 1874، وفي السادس عشر منه قدّم المستشار رسميًا هديته من معمل كافندش إلى الجامعة. وفي المراسلات التي سبقت ذلك كان يُطلق عليه "معمل ديفونشاير". وقد خُصّص اسم "كافندش" تخليدًا لعمل الفيزيائي العظيم قبل قرن من

الزمان، والذي كان ماكسويل على وشك أن يقوم بتحرير كتاباته، وكذلك عرفانًا بسخاء المستشار.

وفي خطاب الشكر الموجه من الجامعة إلى دوق ديفونشاير جاء:

»وأين كان يمكن لتلك العلوم أن تجد عونًا أنسب من بيتكم، الذي اشتهر منذ زمن طويل بهذه المجالات نفسها؟ فمن المعروف أن هنري كافندش، الذي سار كولومب على نهجه، كان أول من شرح طبيعة القوة الكهربائية بطريقة تقوم على القياس العددي، مستخدمًا أساليب ثبت اليوم أنها صحيحة«.

ويقترحون أن يكون الاسم ملائمًا للبناء. وقد ردّ المستشار، بعد أن أشار إلى أعمال هنري كافندش:

»لقد تلقيتُ بامتنان كبير اقتراحكم الكريم بأن يُذكر اسمه في تسمية المعمل نفسه«.

لقد تجاوزت تكاليف البناء التقديرات الأولية بكثير، لكن سخاء المستشار لم يكن محدودًا؛ ففي 21 يوليو 1874 كتب إلى نائب المستشار:

"إن رغبتي أن أوفّر جميع الأجهزة لمعمل كافندش التي قد يرى الأستاذ ماكسويل أنها مطلوبة على الفور، سواء لمحاضراته أو لأغراض أخرى."

أعدّ ماكسويل قائمة بالأجهزة، لكنه أوضح أثناء ذلك أن اختيار أفضل صورة للأدوات يحتاج إلى وقت وتفكير. وكتب إلى نائب المستشار:

"أظن أن الدوق قد فهم تمامًا مما قلته له أن تجهيز المعمل سيكون أمرًا يستغرق عدة سنوات. ومع ذلك، سأعتبر نفسي حرًا في أن أساهم في المعمل بأية أجهزة كنت قد صنعتها في السنوات الماضية وما تزال صالحة للاستعمال، وكذلك في أن أقتني من حين لآخر أجهزة أخرى لأبحاث خاصة."

وفي تقريره السنوي لعام 1877 أعلن الأستاذ ماكسويل أن المستشار قد "أكمل الآن هديته للجامعة بتجهيز معمل كافندش بأجهزة ملائمة للحالة الراهنة للعلم."

ومع ذلك، كان مخزون الأجهزة ما يزال ضئيلًا، على الرغم من أن ماكسويل نفسه أنفق بسخاء مبالغ كبيرة لإضافة أجهزة جديدة؛ فقد كان شديد الحرص على اقتناء أدوات باهظة الثمن من أفضل الصانعين، مع إضافات وتحسينات يقترحها بنفسه.

وفي مارس 1874 أُنشئت وظيفة "مُبرهن في الفيزياء" وعُيِّن فيها السيد غارنيت من كلية القديس جون.

وبدأ العمل في المعمل في أكتوبر 1874. وكان عدد الطلاب في البداية قليلًا، فلم يُسجّل سوى سبعة عشر اسمًا في قائمة "تريبوس العلوم الطبيعية" لسنة 1874، ولم يتخصص كثير منهم في الفيزياء.

وقد تبرّر الخوف الذي أشار إليه الأستاذ في محاضرته الافتتاحية من أن الطلاب الذين يدرسون "تريبوس الرياضيات" لن يجدوا وقتًا للحضور إلى المعمل. فإحدى نقاط الضعف في نظام كامبريدج كانت الفصل بين الرياضيات والعمل التجريبي، وهو ما شجع عليه نظام

الامتحانات. إذ كان يُفترض أن المعرفة التجريبية ليست مطلوبة في امتحانات "تريبوس الرياضيات"، بينما كانت الرياضيات المسموح بها في "تريبوس العلوم الطبيعية" بسيطة جدًا؛ وبهذا لم يحضر كثير من طلاب الرياضيات إلى المعمل، وزاد من سوء الوضع قرار الجامعة في 1877–1878 حين غُيّرت لوائح "تريبوس الرياضيات" مرة أخرى.

ومع ذلك، كان هناك طلاب متحمسون راغبون في العمل، ومعظمهم من الحاصلين بالفعل على درجة البكالوريوس، والذين أرادوا متابعة دراستهم الفيزيائية وأبحاثهم حتى وإن تضمن الأمر "قدرًا كبيرًا من العمل الممل الذي لا يجذب كثيرًا". وقد بدأتُ أنا عملي هناك سنة 1876، ولعله يكون مفيدًا أن أستعيد ذكرياتي من ذلك الوقت.

أول التجارب التي أذكرها كانت تتعلق بقياس المقاومة الكهربائية. وأتذكر جيدًا شرح ماكسويل لمبدأ جسر ويتستون، وتمنيت وقتها أنني التحقت بالمعمل قبل امتحان "تريبوس" لا بعده. فقد وضع اللورد رايلي في الامتحان سؤالًا سهلًا فشلت في حله بسبب نقص معرفتي التجريبية، وقد أظهرت لي كلمات ماكسويل الأولى في حديثه الحل مباشرة.

لم أكن أواظب على حضور محاضراته بانتظام – كانت تُلقى، كما أظن، في ساعة كنت مضطرًا فيها إلى التدريس – فضلًا عن أن كتابه "الكهرباء والمغناطيسية "كان بين يديّ وقد بدأت أقرأ فيه قبل الامتحان.

في ذلك الوقت كان كريستال وسوندر منشغلَين في التحقق من قانون أوم. وكانا يستخدمان عددًا من خلايا دانييل (على شكل صوانٍ وفق تصميم طومسون)، وكان ماكسويل شديد الحرص على أن تُجرى اختبارات متنوعة على هذه الخلايا؛ فقمتُ أنا بذلك، وقضيت وقتًا طويلًا في قياسات بسيطة عليها. ثم وجّهني إلى دراسة بعض خواص عازل مُركّب من طبقات، مكوّن – إذا لم تخنني الذاكرة – من أوراق بارافين وميكا. وبذلك تعرّفت على أجهزة مختلفة. لم تكن هناك دروس منظمة أو تدريبات عرضية مرتبة لأغراض الامتحان؛ فهذه جاءت لاحقًا. أما في زمن ماكسويل، فقد كان مَن يرغب في العمل يجد حرية استخدام المعمل، مع المساعدة والتوجيه منه، لكنهم تُركوا إلى حد كبير ليكتشفوا بأنفسهم الأجهزة وأفضل طرق تشغيلها.

في وقت لاحق جاء "شستر" وأجرى بعض أبحاثه الطيفية. وكان ج. إ. هـ. جوردون مشغولًا بالملاحظات الأولية لتحديد ثابت فيرديه، بينما كان "نيفن" يعمل على تجارب كهربائية متنوعة؛ وكان "فليمنغ" يشتغل على ملفات المقاومة التابعة للجمعية البريطانية.

أما ميولي فكانت تتجه نحو البصريات. وكان ماكسويل حريصًا على أن أبحث في خواص بلورات معينة – أظنها بلورات كلورات البوتاس – التي كتب عنها فيما بعد "ستوكس" و"رايلي". لكن هذه البلورات كان لا بد أن تُنمى، وهي عملية بطيئة كان يظن أنها ستستغرق سنوات؛ وإذ كنتُ أرغب في إعداد أطروحة لامتحان زمالة كلية الثالوث سنة 1877، فقد كان عليّ أن أترك ذلك العمل جانبًا.

واخترتُ في النهاية موضوعًا عن شكل السطح الموجي في البلورة ثنائية المحاور، وبدأت العمل في غرفة خصصها لي. وكان الأستاذ يزورني معظم الأيام ليرى تقدمي. وغالبًا ما كان يجلب كلبه معه، الذي كان يُحتجز أحيانًا في الغرفة المجاورة حين يذهب ماكسويل إلى الكلية. ولم يكن مسموحًا بدخول الكلاب إلى الكلية، وكان ماكسويل يروي بطرافة كيف أن "توبي" (الكلب) دخل مرة إلى "ترينيتي"، وبفطرته الكلبية اكتشف حالًا – بدهشة بالغة – أنه في مكان لم تدخله الكلاب منذ أن أُنشئت الكلية. ولم يكن "توبي" دائمًا هادئًا في غياب صاحبه، وكان وجوده في الغرفة المجاورة مزعجًا بعض الشيء.

وعندما كانت تواجهني صعوبات، كان ماكسويل دائمًا مستعدًا للاستماع. وغالبًا لم يكن الحل يأتي فورًا، لكنه كان يصل بعد وقت قصير. وأذكر أنني في يوم من الأيام واجهت مأزقًا شديدًا، فقصصت عليه مشكلتي مطولًا، فقال:

"حسنًا، لقد كان كريستال يحدثني، وغارنيت وشستر يطرحون أسئلة، وكل ذلك كوّن قشرة سميكة حول دماغي. وما قلته أنت سيستغرق بعض الوقت لينفذ، لكننا سنرى الأمر."

وبعد بضعة أيام عاد وقال:

"لقد فكرتُ فيما قلته لي مؤخرًا، وإذا فعلت كذا وكذا فسيكون الأمر على ما يرام."

وقد أُحيلت أطروحتي إليه، وفي يوم الانتخاب، حين كنتُ أعود إلى كامبريدج من أجل الاعتماد، التقيت به في محطة "بليتشلي"، وما زلت أتذكر تهنئته الودية وكلماته المشجعة الحارة.

وعلى مدى العام والنصف التالي، كنتُ أعمل بانتظام في المعمل، وأراه تقريبًا يوميًا أثناء الفصل الدراسي.

السنوات الأخيرة من حياته العلمية

ليس هناك الكثير ليُذكر عن هذه السنوات الأخيرة. فقد استمر عمله العلمي الخاص. كتابه "الكهرباء والمغناطيسية "كُتب في الغالب في غلنلير. وحين عاد إلى كامبريدج في أكتوبر 1872، كتب إلى لويس كامبل قائلاً:

"أنا منشغل باستمرار في تحريك دار نشر كلارندون، لكنها كانت منتظمة إلى حد معقول خلال الشهرين الماضيين. أجد أن متوسط إنتاجهم هو تسع صفحات خلال ثلاثة عشر أسبوعًا. تيت يساعدني كثيرًا في كشف السخافات. وأنا أميل الآن إلى الاعتماد على الأرباع (quaternions)، وقد وضعت بعضها في كتابي".

وقد نُشر الكتاب عام 1873. وكتب "الكتاب المدرسي للحرارة "خلال نفس الفترة، في حين نُشر كتابه "المادة والحركة"، وهو "كتاب صغير عن موضوع عظيم"، في عام 1876.

في عامي 1873 و1874، كان واحدًا من الممتحنين في "ترايبوس العلوم الطبيعية"، وفي عام 1873 كان أول ممتحن إضافي لـ

"تريبوس الرياضيات"، وفقًا للخطة التي ساهم في ترويجها كثيرًا عام 1868.

تم كتابة العديد من مقالاته القصيرة في نفس الفترة. كانت الطبعة التاسعة من الموسوعة البريطانية تُنشر حينها، واستعان به الأستاذ باينز في العمل. ومن مقالاته" :الذرة"، "الجذب"، "الخاصية الشعرية"، "تركيب الأجسام"، "الانتشار"، "الأثير"، "فاراداي "وغيرها.

كما كتب عددًا من المقالات لمجلة .Natureبعض هذه المقالات كانت مراجعات للكتب أو تقارير عن العلماء، مثل المقالات عن فاراداي و هلمهولتز والتي ظهرت مع صورهما؛ وبعضها الآخر كان مساهمات علمية أصلية، وكثير منها تناول التركيب الجزيئي للأجسام.

وقد ألقى محاضرتين مهمتين:

1. المحاضرة الأولى عن "الجزيئات "أمام الجمعية البريطانية في برادفورد عام 1873.
2. المحاضرة الثانية عن "الدليل الديناميكي على التركيب الجزيئي للأجسام "أمام الجمعية الكيميائية عام 1875.

وكانت الجمل الأخيرة من المحاضرة الأولى قد اقتُبست كثيرًا، وجاءت كما يلي:

"في السماوات نكتشف بالضوء، وبالضوء وحده، نجومًا بعيدة عن بعضها البعض بحيث لا يمكن لأي شيء مادي أن ينتقل من واحد إلى آخر؛ ومع ذلك يخبرنا هذا الضوء، الذي هو الدليل الوحيد على وجود

هذه العوالم البعيدة، أن كل واحدة منها مبنية من جزيئات من نفس النوع الموجود على الأرض. على سبيل المثال، جزيء الهيدروجين، سواء في سيريوس أو أركتوروس، يهتز في نفس الزمن بالضبط. لذا يحمل كل جزيء في الكون ختم نظام قياس محدد، تمامًا كما يحمل المتر في الأرشيفات بباريس أو المذرع الملكي المزدوج في معبد قرناق.

لا يمكن تشكيل أي نظرية تطورية لتفسير تشابه الجزيئات، لأن التطور يستلزم التغير المستمر، والجزيء عاجز عن النمو أو التلف، أو عن التولد أو الانقراض.

لم تُحدث أي عمليات طبيعية منذ بدء الطبيعة أدنى اختلاف في خواص أي جزيء. لذا لا يمكننا نسب وجود الجزيئات أو تطابق خصائصها لأي من الأسباب التي نسميها طبيعية.

من ناحية أخرى، إن التساوي التام لكل جزيء مع جميع الجزيئات من نفس النوع يمنحه، كما قال السير جون هيرشل، صفة جوهرية للمنتج المصنّع، ويمنع فكرة كونه أزليًا ومستقل الوجود.

وهكذا قادنا الطريق العلمي الصارم إلى الحد الذي يتوقف عنده العلم، ليس لأن العلم محظور من دراسة الآلية الداخلية للجزيء الذي لا يمكن تفكيكه، كما لا يمكنه دراسة الكائن الحي الذي لا يمكن تجميعه. لكن عند تتبع تاريخ المادة، يتوقف العلم حين يتأكد من أن الجزيء مصنوع، لكنه لم يُصنع بواسطة أي من العمليات التي نسميها طبيعية. العلم عاجز عن الاستدلال على خلق المادة نفسها من العدم. لقد بلغنا أقصى حدود قدراتنا الفكرية عندما اعترفنا بأنه بما أن المادة لا يمكن

أن تكون أزلية ومستقلة الوجود، فلا بد أنها قد خُلقت. فقط عندما نتأمل، ليس المادة في ذاتها، بل في الشكل الذي توجد به فعليًا، يجد عقلنا شيئًا يمكنه التمسك به.

أن للمادة، كما هي، خصائص أساسية معينة، وأنها موجودة في الفراغ وقادرة على الحركة، وأن حركتها مستمرة، وما إلى ذلك، هي حقائق يمكن، حسب معرفتنا، أن تُسمى بالضرورية كما يسميها الفلاسفة الميتافيزيقيون. يمكننا استخدام معرفتنا بهذه الحقائق لأغراض الاستدلال، لكن لا توجد لدينا بيانات للتكهن بأصلها. لكن أن يكون هناك بالضبط قدر معين من المادة ولا أكثر في كل جزيء من الهيدروجين، فهذه حقيقة من نوع مختلف جدًا. لدينا هنا توزيع محدد للمادة—تجميع، لاستخدام تعبير الدكتور تشالمرز، لأشياء لا نجد صعوبة في تخيلها مرتبة بشكل مختلف.

شكل وأبعاد مدارات الكواكب، على سبيل المثال، لا تحددها أي قوانين طبيعية، بل تعتمد على ترتيب معين للمادة. ونفس الأمر بالنسبة لحجم الأرض، الذي استُخلص منه معيار ما يُسمى بالنظام المتري. لكن هذه المقاييس الفلكية والأرضية أقل أهمية علمية بكثير مقارنة بأهم معيار على الإطلاق يشكل أساس النظام الجزيئي.

كما نعلم، تعمل الأسباب الطبيعية على تعديل، إن لم يكن تدمير، جميع ترتيبات وأبعاد الأرض ونظامها الشمسي. لكن رغم حدوث كوارث خلال العصور وربما تحدث في السماوات، رغم انحلال الأنظمة القديمة وظهور أنظمة جديدة من بقاياها، تظل الجزيئات التي بُنيت منها هذه الأنظمة—الحجارة الأساسية للكون المادي—سالمة وغير

تالفة. فهي مستمرة حتى اليوم كما خُلقت—مثالية في العدد والقياس والوزن؛ ومن العلامات التي لا تمحى المطبوعة عليها يمكننا أن نتعلم أن تلك الطموحات نحو الدقة في القياس والعدالة في العمل، والتي نعتبرها من أسمى صفاتنا كبشر، هي لنا لأنها مكونات أساسية لصورة الله الذي خلق في البداية، ليس فقط السماء والأرض، بل المواد التي تتكون منها السماء والأرض".

وقد انتقد ذلك سير. سي. جي. مونرو في مجلة *Nature*، ولاحقًا في مقال من كتابات كليفلورد.

كما توجد بعض المراسلات مع أسقف غلوستر وبريستول حول سلطة المقارنة بين الجزيئات والمنتجات المصنّعة أوردها الأستاذ كامبل، وفيها يشير ماكسويل إلى أن الجزء الأخير من مقالته "الذرة" في الموسوعة البريطانية كان بهدف الرد على نقد مونرو.

في عام 1874، اجتمعت الجمعية البريطانية في بلفاست برئاسة تايندال، وكان ماكسويل حاضرًا، ونشر لاحقًا في مجلة Blackwood’s Magazine إعادة صياغة مرحة لخطاب الرئيس. وقد كتب أيضًا بعض الأبيات في نفس الفترة، والتي جمعها الأستاذ كامبل، وتظهر جانبي شخصيته: الجاد والمرح.

أعمال كافنديش

من 1874 إلى 1879، انكب ماكسويل على تحرير أعمال هنري كافنديش.

كافنديش، عم كبير المستشار، نشر ورقتين فقط عن الكهرباء، لكنه

ترك حوالي عشرين حزمة مخطوطات عن الكهرباء الرياضية والتجريبية. وقد وُضعت هذه المخطوطات في يد ماكسويل في 1874 من قبل دوق ديفونشير.

كتب نيفن في مقدمته للأعمال المجمعة:

"هذا العمل، الذي نشر في 1879، زاد من شهرة كافنديش، إذ كشف التقدّم غير المتوقع الذي أحرزه هذا الفيزيائي الحاد في نظرية الكهرباء، خصوصًا في قياس الكميات الكهربائية. العمل غني بملاحظات قيّمة، حيث يتم فحص آراء ونتائج كافنديش وفق النظرية والأساليب الحديثة. كانت الأساليب الخاصة بتحديد السعات الكهربائية للموصلات والمكثفات ذات قيمة خاصة، وقد أظهر كافنديش براعة كبيرة فيها رياضيًا وتجريبيًا".

وأضاف ماكسويل في المقدمة:

"من الصعب تفسير سبب احتفاظ كافنديش بمخطوطاته دون نشرها رغم تحضيره وصفًا كاملًا لتجاربه حول شحن الأجسام وكتابتها نسخة نظيفة قبل 1774، واستمراره في التجارب حتى 1781، وعاش حتى 1810. كان اهتمامه بالبحث أكثر من اهتمامه بالنشر. لم يهدف لإخبار الآخرين بما اكتشفه، لذا بقيت أبحاثه مجهولة لمعظم العلماء".

نجح ماكسويل في إعادة إحياء هذه الأعمال وفهم أساليب كافنديش، وأظهر أنه سبق العديد من الاكتشافات في الكهرباء، مثل مفهوم السعة الكهربائية والسعة الاستنتاجية النوعية، وتوقع قانون أوم.

سنواته الأخيرة وعمله العلمي

خلال السنوات الأخيرة من حياته، عانت زوجة ماكسويل من مرض طويل، ما زاد عبء ماكسويل كونه الممرّض الشخصي لها. أحيانًا لم ينام في السرير لثلاثة أسابيع، ومع ذلك ألقى محاضراته وأجرى تجاربه كالمعتاد.

في هذه الفترة، أعيد الاجتماع بين بعض "الرسل" من 1853–1857 لمناقشة الأمور العلمية في نادي يُسمّى "إيرانوس". ثلاثة من مساهمات ماكسويل فيه محفوظة ومنشورة.

بعد إكمال أوراق كافنديش، أتيح لماكسويل وقت أكبر لأبحاثه الأصلية. نُشرت ورقتان مهمتان عام 1879:

1. الإجهادات في الغازات المخففة الناتجة عن تفاوت درجات الحرارة، في Transactions of the Royal Society، حول نظرية الراديوميتر.
2. مبرهنة بولتزمان، في Transactions of the Cambridge Philosophical Society.

كما ألقى محاضرة ريد عن "الهاتف"، وبدأ تجهيز الطبعة الثانية من كتابه الكهرباء والمغناطيسية.

صحته ووفاته

انهارت صحة ماكسويل خلال فصل عيد الفصح 1879، وكان يعاني من أعراض عسر الهضم منذ سنتين دون استشارة طبيب. غادر كامبريدج في يونيو على أمل التعافي في غلنلير، لكنه تدهور. في

أكتوبر أبلغه الدكتور ساندرز بإدنبرة أنه لم يتبق له سوى شهر للعيش. عاد إلى كامبريدج تحت رعاية الدكتور باجيت الذي خفف من آلامه جزئيًا، لكن المرض، الذي توفيت والدته منه في نفس العمر، استمر. توفي في 5 نوفمبر. كان اهتمامه الوحيد في أيامه الأخيرة زوجته المريضة التي كانت تعتمد عليه.

أُقيمت جنازة في كنيسة كلية ترينيتي، ثم نُقلت رفاته إلى أسكتلندا ودفن في المقبرة العائلية في كورسوك، كيركوكودبريث.

إرثه العلمي

نشرت دار جامعة كامبريدج طبعة تذكارية من أعماله عام 1890. ويعلّق بورتريه له لوس ديكنسون في قاعة ترينيتي، ويوجد تمثال نصفي لبوهيم في المختبر.

تبرعت زوجته بمكتبته العلمية لمختبر كافنديش، وعند وفاتها تركت حوالي 6000 جنيه لإنشاء منحة في الفيزياء بالمختبر.

الجوانب الدينية والشخصية

حياته لم تكن محصورة بالعلم فقط. رسائله إلى زوجته وأصدقائه المقربين تظهر مدى تمسكه بمعتقداته الدينية.

نشيد طالب المساء، الذي ألفه عام 1853، يظهر هذا الشعور:

"من خلال المخلوقات التي خلقتها،
أظهر إشراق مجدك،
لتُعرض الحقيقة الأبدية
في جوهرها العابر،
حتى الأرض الخضراء والمحيط الشاسع،
والصخور الضخمة والنباتات الرقيقة،
تخبر القصة الأبدية نفسها:
'نحن الحقيقة متجسدة في صورة.'
علمني أن أقرأ أعمالك،
ليزداد إيماني قوة جديدة،
ولأسعى عبر العوالم،
مطاردًا البحث المثمر عن الحكمة،
حتى يملأ نسيمك عقلي،
أعلن العقيدة الأبدية،
متجددًا في الموضوع المجيد،
الله ربنا هو الله بحق".

وفي رسائله إلى الأسقف إليكوت و سكرتير معهد فيكتوريا، عبّر ماكسويل عن رأيه في العلاقة بين العلم والإيمان:

- على الإنسان أن يدرس الكون ليستوعب مجد الله، لكن النتائج التي يصل إليها كل شخص عند التوفيق بين علمه ومسيحيته هي خاصة به ولا يُعطى لها صفة عامة.

أوضح أصدقاؤه ومعارفه أن إيمانه كان قويًا حتى آخر أيامه، وقال على فراش الموت إنه كان مشغولًا بمحاولة الوصول إلى الحقيقة، وإن القليل من الحقيقة الذي يستطيع الإنسان معرفته هو مهم، لكن الأهم هو معرفته بمن آمن به.

الفصل السابع

العمل العلمي ــــ رؤية الألوان

لقد مضت خمس عشرة سنة فقط منذ وفاة كليرك ماكسويل، وما زال من المبكر جدًا تكوين تقدير دقيق لقيمة أعماله وعلاقتها بأعمال الآخرين الذين عملوا في نفس المجال.

يقول نيفن في نهاية مقاله عن وفاته في Proceedings of the Royal Society:

"نادراً ما توجد في عقل واحد قدرات الاختراع والشرح، والولع بالعلوم الفيزيائية والقدرة على تطويرها رياضيًا بنفس الدرجة. ومع ذلك، لوصف التفاصيل الدقيقة للأعمال الناتجة عن هذا المزيج، سيكون مطلوبًا قدرات شبيهة بتلك التي كان يمتلكها ماكسويل نفسه، فكل عمل منها يحمل بصمة عبقرية دقيقة وواضحة".

ويضيف في مقدمة أعمال ماكسويل الصادرة عام 1890:

"ولا يبدو للمحرر الحالي أن الوقت قد حان بعد لتقدير التأثير المحفّز لعقل ماكسويل على الفكر العلمي الحديث".

هدف هذه السلسلة هو محاولة تقديم لمحة عن أعمال العلماء خلال المائة عام الماضية، وإظهار مساهمة كل منهم في مخزوننا الحالي من المعرفة. وفي هذا الصدد، يعترف المؤلف بالاستفادة من أعمال من كتبوا عن ماكسويل، خصوصًا:

- د. دبليو. دي. نيفن، مقدمة أوراق ماكسويل.
- السيد غارنيت، مؤلف الجزء الثاني من "حياة ماكسويل."
- الأستاذ تيت، الذي نشر في مجلة Natureبتاريخ 5 فبراير 1880 مقالًا عن أعمال ماكسويل، مختصرًا لكنه كافٍ لتوضيح مساهماته الكبيرة حتى للقراء غير المتخصصين رياضيًا.

يمكن تصنيف مساهمات ماكسويل الأساسية في ثلاثة مجالات:

1. إدراك الألوان(Colour Perception)
2. الفيزياء الجزيئية(Molecular Physics)
3. النظريات الكهربائية(Electrical Theories)

بالإضافة إلى ذلك، كتب مقالات مهمة مثل:

- "حلقة زحل"
- "توازن الأجسام الصلبة المرنة"
- مذكرات في الهندسة البحتة والمسائل الميكانيكية

لكن هذه الأعمال، على الرغم من أهميتها، ليست التي سيُتذكر بها اسمه غالبًا.

بدأ ماكسويل العمل على هذا الموضوع منذ زمن مبكر، أثناء دراسته في إدنبرة، حيث كان مهتمًا بنظريات هاي.

- أول ورقة منشورة له كانت رسالة إلى د. ج. ويلسون، في Transactions of the Royal Society of Artsعام 1855.
- لكنه كان يجري تجارب مزج الألوان باستخدام دولابه الدوار منذ فترة قصيرة قبل ذلك، ونتائج هذه التجارب نُشرت بعنوان Experiments on Colourفي Transactions of the Royal Society of Edinburgh.

في ورقته عن نظرية الألوان المركبة (Philosophical Transactions, 1860)، قدم ماكسويل تاريخ النظرية كما عرفها، وميّز بين:

1. الخصائص البصرية :تتعلق بأصل الضوء وانتشاره عبر الوسط حتى يصل إلى عضو الإبصار، وتعتمد على ترددات وامتدادات اهتزازات الأثير.
2. الخصائص اللونية :(Chromatic) تتعلق بقدرته على إثارة إحساسات معينة بالألوان عبر الإبصار.

يمكن لشعاعين أن يكونا مختلفين بصريًا لكن متشابهان لونيًا، والعكس غير صحيح؛ الشعاعان البصريان المتشابهان يكونان أيضًا متشابهان لونيًا.

أسس النظرية

- نيوتن وضع الأسس الأولى: أظهر أن مزج الضوء المتجانس يمكن أن ينتج ألوانًا تشبه ألوان الضوء المتجانس في المظهر، لكنها مختلفة في الطبيعة والخصائص البصرية.
- على سبيل المثال: مزج الأحمر والأصفر يعطي برتقاليًا مشابهًا للبرتقالي الطيفي من الناحية اللونية، لكنه قابل للتحليل إلى الأحمر والأصفر، بينما البرتقالي الطيفي لا يمكن تحليله أكثر.

نيوتن حل أيضًا مسألة: معرفة لون المركب عند مزج ألوان أولية معينة بالكمية والنوعية المحددة لكل منها.

- وضع سبعة ألوان الطيف حول دائرة، ومساحة كل لون كانت متناسبة مع الفاصل الموسيقي الذي يتوافق معه اللون.
- وضع وزنًا في مركز كل قوس متناسبًا مع عدد الأشعة من هذا اللون في المزج.
- مركز الثقل يشير إلى اللون الناتج، ونصف القطر من المركز يعطي شدة اللون، والمركز نفسه يمثل الأبيض.

ماكسويل أثبت صحة طريقة نيوتن في تحديد مركز الثقل للألوان المركبة، وأوضح أن النظرية رياضيًا تعتمد على ثلاثة عناصر لونية، لكن ترتيب الألوان على الدائرة كان فقط ترتيبًا مؤقتًا، والعلاقات الحقيقية للألوان يجب تحديدها بالتجربة المباشرة.

توماس يونغ

- جاء بعد نيوتن، ودرس إحساس اللون بالعين عن طريق الأقراص الدوارة الملونة، كما فعل ماكسويل لاحقًا.
- طور النظرية القائلة بأن العين تستشعر ثلاثة إحساسات أولية مختلفة للضوء، ويعتمد لون أي شعاع على نسبة إثارة هذه الإحساسات الثلاثة.
- اعتبر أن الإحساسات الثلاثة تتوافق مع الأحمر والأخضر والبنفسجي.
- أي لون يمكن تكوينه بمزج الألوان الثلاثة الأساسية بالنسب الصحيحة.

تجارب ماكسويل

- هدفها إثبات أو نفي الجزء الفيزيائي من نظرية يونغ، دون التطرق إلى السؤال الفسيولوجي عن وجود ثلاثة إحساسات أولية حقيقية.
- أظهر أنه يمكن بمزيج صحيح من ثلاثة ألوان معيارية اختيارية مطابقة أي لون آخر.

- على سبيل المثال، في إحدى تجاربه: مزج 66.6 جزءًا من الأحمر مع 33.4 جزءًا من الأخضر يعطي نفس التأثير اللوني لمزيج 29.1 جزءًا أصفر و24.1 جزءًا أزرق.

طريقة العمل

- استخدم ماكسويل أقراصًا ملونة توضع على محور دوار (دوّار أو دولاب دوار)، كل قرص مقسم شعاعيًا مع فتحة في المركز.
- عند دوران المحور بسرعة، تتتابع الانطباعات الناتجة عن كل لون على شبكية العين، وتندمج لتظهر كلون مركب.
- استخدم 6 أقراص لكل حجم: أسود، أبيض، أحمر، أخضر، أصفر، أزرق.
- الأقراص الكبيرة توضع أولًا، ثم الصغيرة، بحيث يعطي المركز اللون الناتج عن الأقراص الصغيرة، والأطراف اللون من الأقراص الكبيرة.
- يمكن التعبير عن النتائج رياضيًا:
  - إذا كانت A, B, C, D ألوانًا مختلفة، و a, b, c, d كميات كل لون، يمكن أن نقول:

aجزء من A + b جزء من B = c جزء من C + d جزء منD

هذا هو الأساس الذي استخدمه ماكسويل لإثبات إمكانية مطابقة الألوان المركبة باستخدام ثلاثة ألوان معيارية.

يمكن التعبير عن مطابقة الألوان بالمعادلة:

$$a A + b B = c C + d D$$

حيث يشير + إلى "مزج مع"، و= إلى "مطابق في الدرجة اللونية."

يمكن أيضًا كتابتها على الشكل التالي:

$$d D = a A + b B - c C$$

أي أن d جزءًا من اللون D يمكن مطابقته بمزيج مناسب من الألوان A, B, C. العلامة - تعني أنه من أجل المطابقة يجب دمج اللون C مع D، بحيث يطابق هذا المزيج مزيج A و B.

بهذه الطريقة يمكن تكوين عدد من المعادلات لجميع الألوان الممكنة. وإذا اخترنا أي ثلاثة ألوان A, B, C كمعايير، نحصل على المعادلة العامة:

$$x X = a A + b B + c C$$

أي أن x جزءًا من اللون X يمكن مطابقته بمزيج من a جزء من A ، و b جزء من B ، و c جزء من C. وإذا كان أحد القيم a, b, أو c سالبًا، فهذا يعني أن هذا اللون يجب دمجه مع X لمطابقة اللونين الآخرين.

أظهر ماكسويل أنه إذا تم اختيار A, B, C بشكل مناسب، يمكن مطابقة معظم الألوان الأخرى بمزيج إيجابي من هذه الثلاثة، وبالتالي تصبح هذه الألوان الثلاثة ألوانًا أولية، ويمكن مطابقة معظم الألوان الأخرى بمزيج منها.

ومع ذلك، لم تكن التجارب بالأقراص الملونة، مثل تلك التي قام بها يونغ وفوربس وماكسويل، كافية لإعطاء نتائج دقيقة. كانت ألوان الأقراص غير نقية ولم تكن مطابقة للألوان الطيفية بدقة، وكانت تختلف قليلًا حسب طبيعة الضوء الساقط. لهذا السبب قام هلمهولتز في عام 1852 بتجارب على الطيف، وفي نفس الوقت اخترع ماكسويل صندوق الألوان.

مبدأ صندوق الألوان بسيط جدًا: لنفترض وجود فتحة S وبعض الترتيبات لتشكيل طيف نقي على شاشة. الآن نضع فتحة R في الجزء الأحمر من الطيف على الشاشة. عندما يسقط الضوء على الفتحةS ، يمكن أن تصل الأشعة الحمراء فقط إلى .R وبالعكس، إذا وُضع المصدر الأبيض عند الطرف الآخر بحيث يُضاء R بالضوء الأبيض، تصل الأشعة الحمراء فقط إلى .S بالمثل، إذا وُضعت فتحة أخرى عند Gللأخضر، وفُيضت بالضوء الأبيض، تصل الأشعة الخضراء فقط إلىS ، ومن فتحة ثالثة V للبنفسجي، تصل أشعة بنفسجية فقط إلى.S

عند فتح الفتحات الثلاثة V, G, R معًا والنظر من خلالS ، تتلقى شبكية العين انطباعًا عن الألوان الثلاثة المختلفة. تعتمد كمية الضوء لكل لون على عرض الفتحة المقابلة، ويمكن مقارنة شدة المكونات الثلاثة بمقارنة عرض الفتحات الثلاثة. أي لون آخر يدخل العين في نفس

الوقت يمكن مطابقته إذا كانت الألوان الأحمر والأخضر والبنفسجي هي الألوان الأولية.

باستخدام صندوق الألوان، أثبت ماكسويل أنه يمكن الحصول على مطابقة بين أي أربعة ألوان، وإن لم تُجرَ التجارب بالطريقة البسيطة المذكورة أعلاه، ويوجد وصف كامل للطريقة في ورقة ماكسويل نفسه، حيث كان الهدف مطابقة الأبيض القياسي بمزيجات مختلفة من الألوان الأخرى.

الهدف الرئيسي من بحثه كان دراسة الخصائص اللونية لأجزاء الطيف المختلفة، وتحديد شكل المنحنى الذي يجب أن يحل محل دائرة نيوتن في مخطط الألوان.

اعتمد ماكسويل ثلاثة ألوان معيارية: الأحمر بطول موجي حوالي 6302 أنغستروم، والأخضر بطول 5281 أنغستروم، والبنفسجي 4569 أنغستروم. على مقياس جهاز ماكسويل، تمثل هذه الألوان الأرقام 24 و44 و68 على التوالي.

لتمثيل هذه الألوان على مخطط، نأخذ ثلاث نقاط A, B, C في زوايا مثلث متساوي الأضلاع. يتم تحديد موقع أي لون آخر على المخطط بأخذ أوزان تتناسب مع كمية الألوان A, B, C المطلوبة لمطابقة اللون، وتوضع هذه الأوزان عندA, B, C ، ويكون مركز ثقلها هو النقطة المطلوبة.

على سبيل المثال، يعطي موقع الأبيض المعادلة:

$$W = 18.6\ (24) + 31.4\ (44) + 30.5\ (68)$$

أي أن الأوزان المتناسبة 18.6، 31.4، 30.5 توضع عند A, B, C ويُحسب مركز ثقلها ليحدد موقع الأبيض. أي لون آخر يُعطى بالمعادلة:

$$X = a (24) + b (44) + c (68)$$

إذا كانت جميع القيم a, b, c موجبة، يقع اللون داخل مثلث .ABC إذا كانت إحدى القيم، مثلc ، سالبة، نطبق نفس البناء لكن نعامل الوزن عند C في الاتجاه المعاكس بالنسبة للآخرين. يوضح ماكسويل أنه باستخدام معاييره، يمكن تمثيل معظم الألوان بنقاط داخل المثلث، وكانت ألوانه المختارة قريبة جدًا من الألوان الأولية.

أثبت أيضًا أن أي لون طيفي بين الأحمر والأخضر، عند دمجه مع كمية صغيرة جدًا من البنفسجي، يمكن مطابقته بمزيج مناسب من الأحمر والأخضر، وبالتالي تقع ألوان الطيف بين الأحمر والأخضر بالقرب من الخطAB ، أما ألوان الطيف بين الأخضر والبنفسجي فتقع على منحنى خارج الخط .BC أي لون طيفي بين الأخضر والبنفسجي، مع قليل من الأحمر، يمكن مطابقته بمزيج من الأخضر والبنفسجي.

لذلك يجب استبدال دائرة نيوتن بمنحنى يقارب جانبي المثلث AB و .BCألوان البنفسج تقع تقريبًا على الجانب الثالث CA من المثلث، ويتم الحصول عليها بمزج البنفسجي مع الأحمر تقريبًا.

لتحديد موقع اللون الناتج عن مزج لونين أو أكثر، وفقًا لقاعدة نيوتن، نضع أوزانًا عند النقاط المقابلة للألوان المختارة ونحسب مركز ثقلها.

هذه كانت نتيجة عمل ماكسويل على الألوان. وقد أكد الجزء الأساسي من بناء نيوتن وحصل لأول مرة على الشكل الصحيح لمنحنى الطيف على المخطط.

شكل المنحنى يعتمد بالطبع على عين المراقب. قام ماكسويل والسيدة ماكسويل بالملاحظات، ووجدت فروق واضحة بين أعينهما. ومع ذلك، يبدو أن الغالبية العظمى من الأشخاص لديهم رؤية طبيعية، وتُقبل المطابقات التي يقوم بها أحدهم من قبل الآخرين.

بعض الأشخاص يعانون من عمى الألوان، وفحص ماكسويل بعضهم، وظهر أن رؤيتهم ثنائية اللون، إذ اختفى الإحساس بالأحمر، ويمكن مطابقة معظم الألوان بمزيج من الأخضر والبنفسجي، فاختصر مخطط الألوان إلى الخط .BC وقد تم لاحقًا دراسة أشكال أخرى لعمى الألوان.

عند منح ماكسويل ميدالية رامفورد عام 1860، قال الجنرال سابين، نائب رئيس الجمعية الملكية، بعد شرح نظرية رؤية الألوان وطريقة التحقق منها:

"لقد خضع البروفيسور ماكسويل هذه النظرية للتحقق، وبهذا رفع تركيب الألوان إلى مرتبة فرع من الفيزياء الرياضية. وتشير الأبحاث التي مُنحت من أجلها ميدالية رامفورد إلى النتيجة المذهلة، وهي أنه بدرجة تقريبية عالية يمكن تقليد جميع ألوان الطيف، وبالتالي جميع الألوان في الطبيعة التي هي مجرد مزيجات منها، تمامًا بمزيج من ثلاثة ألوان يمكن تحقيقها فعليًا، وهي الأحمر والأخضر والأزرق، والتي تنتمي إلى ثلاثة أجزاء معينة من الطيف".

يجدر التنويه بأن نتائج ماكسويل كانت فيزيائية بحتة. فهي لا تتناقض مع الجزء الفسيولوجي من نظرية يونغ، أي أن هناك ثلاث إحساسات أولية بالألوان يمكن نقلها إلى الدماغ، وأن لون أي جسم يعتمد على النسب التي تُثار فيها هذه الإحساسات، لكنها لا تثبت النظرية نفسها. أي نظرية فسيولوجية صحيحة يجب أن تفسر ملاحظات ماكسويل، ونظرية يونغ تفعل ذلك، لكن من الممكن أن تفسر نظريات أخرى الملاحظات بنفس الدقة أو أكثر توافقًا مع الملاحظات الفسيولوجية. ماكسويل قدم الحقائق الفيزيائية التي يجب تفسيرها، والباقي للفسيولوجيين.

الفصل الثامن

العمل العلمي – النظرية الجزيئية

في مقاله "الذرة" في الطبعة التاسعة لموسوعة بريتانيكا، قدم ماكسويل بعض المعلومات عن العلوم الجزيئية الحديثة، وبخاصة النظرية الجزيئية للغازات. ويعتبر كل من كلاوسيوس وماكسويل مؤسسي هذه العلم، على الرغم من أنه تم مؤخراً إضافة اسم ثالث، وهو ووترستون. في هذا الفصل، نهدف إلى تقديم لمحة عن إسهامات ماكسويل في العلم الجزيئي، وشرح التقدمات التي تحققت بفضله.

العقيدة القائلة بأن الأجسام تتكون من جزيئات صغيرة في حركة سريعة قديمة جدًا. كان ديموقريطس مؤسسها، وشرح لوكريتيوس في كتابه *De Rerum Naturâ* مبادئها. الذرات لا تملأ الفضاء، بل هناك فراغ بينها.

وفقاً لبوسكوفيتش، الذرة هي نقطة غير قابلة للتجزئة، لها موقع في الفضاء، قابلة للحركة، وتمتلك كتلة. كما أن لها القدرة على ممارسة القوة، بحيث تجذب أو تدفع الذرات بعضها البعض بقوة تعتمد على المسافة بينها. ليس لها أجزاء أو أبعاد: هي مجرد نقطة هندسية بلا امتداد في الفضاء؛ ولا تمتلك خاصية عدم النفاذ، إذ يمكن افتراض أن ذرتين تتواجدان في نفس النقطة.

في العلم الجزيئي الحديث وفقًا لماكسويل:

"نبدأ بالافتراض أن الأجسام تتكون من أجزاء كل منها قادر على الحركة، وأن هذه الأجزاء تتفاعل مع بعضها بطريقة متوافقة مع مبدأ حفظ الطاقة. نحن مبررون في هذا الافتراض، لأن الأجسام يمكن تقسيمها إلى أجزاء أصغر، وكل الأجسام التي نعرفها هي أنظمة محافظة، ولن يكون الأمر كذلك إلا إذا كانت أجزاؤها أيضًا أنظمة محافظة.

يمكننا أيضًا افتراض أن هذه الأجزاء الصغيرة في حركة. هذا هو الافتراض الأكثر عمومية الذي يمكننا القيام به، لأنه يشمل كحالة خاصة النظرية التي تكون فيها الأجزاء الصغيرة ساكنة. ظواهر انتشار الغازات والسوائل من خلال بعضها البعض تظهر أن هناك حركة للأجزاء الصغيرة للجسم قد لا تكون محسوسة لنا.
لا نفترض شيئًا عن طبيعة الأجزاء الصغيرة – سواء كانت جميعها متساوية في الحجم، ولا نفترض أن لها امتدادًا أو شكلًا. كل جزء يقاس بكتلته، وأي جزأين منهما يجب أن يمتلكا القدرة على التأثير في بعضهما عند اقترابهما بما فيه الكفاية. خصائص الجسم أو الوسط تحددها تركيبة أجزائه".

تسمى هذه الجزيئات الصغيرة جزيئات، وقد عرف ماكسويل الجزيء في الجانب الفيزيائي بالمصطلح التالي:

"جزيء المادة هو جسم صغير، إذا جُمعت عدة جزيئات مماثلة منه معًا، تشكل كتلة من هذه المادة؛ وإذا أزيل أي جزء من هذا الجزيء، لن يكون قادرًا، مع مجموعة من الجزيئات الأخرى التي عوملت بالمثل، على تكوين كتلة من المادة الأصلية".

يجب أن نعتبر الغاز كمجموعة من الجزيئات الطائرة في جميع الاتجاهات. مسار أي جزيء يكون خطًا مستقيمًا، باستثناء الوقت الذي يكون فيه تحت تأثير جزيء مجاور؛ وعادةً ما يكون هذا الوقت قصيرًا مقارنة بالمدة التي يكون فيها حرًا.

أبسط نظرية يمكننا صياغتها هي أن الجزيئات تتصرف مثل كرات مرنة، وأن التفاعل بين أي اثنين يكون تصادماً وفق القوانين المعروفة لتصادم الأجسام المرنة. إذا كانت المسافة المتوسطة بين جزيئين كبيرة مقارنة بأبعادهما، فإن الوقت الذي يقضيه أي جزيء في التصادم يكون صغيرًا مقارنة بالمدة بين التصادمات، وهذا يتوافق مع الافتراض الأساسي المذكور. ومع ذلك، ليس من الضروري افتراض أن اللقاء بين جزيئين هو تصادم. قد يؤثر جزيء على الآخر بقوة تعتمد على المسافة بينهما، بحيث تكون القوة غير محسوسة إلا عندما تكون الجزيئات قريبة جدًا.

ليس من الصعب فهم كيف يمكن تفسير الضغط الذي يمارسه الغاز على جوانب الوعاء وفقًا لهذا الافتراض. عند اصطدام أي جزيء بالجانب، ينقلب زخم حركته – الجزيئات هنا تفترض أنها مرنة تمامًا.

هكذا، يكتسب كل جزيء من الغاز الزخم باستمرار من جوانب الوعاء، بينما ينقل للوعاء الزخم الذي كان يمتلكه قبل الاصطدام. معدل تغير الزخم عبر وحدة مساحة يقيس القوة المطبقة على تلك المساحة؛ أي أن ضغط الغاز هو معدل تغير الزخم لكل وحدة مساحة من السطح.

يمكن أيضًا إثبات أن هذا الضغط يتناسب مع حاصل ضرب كتلة كل جزيء، وعدد الجزيئات في وحدة الحجم، ومربع سرعة الجزيئات.

لنأخذ مثالاً على نفاثة من الرمل أو الماء بمقطع وحدة تضرب سطحًا. لنفترض أن جميع الجزيئات التي تضرب السطح لها نفس السرعة.

عدد الجزيئات التي تضرب السطح في الثانية يكون متناسبًا مع هذه السرعة. إذا كانت الجزيئات سريعة، يمكنها الوصول إلى السطح من مسافة أكبر في ثانية واحدة مقارنة بالجزيئات البطيئة. عدد الجزيئات التي تصل إلى السطح يتناسب أيضًا مع عدد الجزيئات لكل وحدة حجم. بالتالي، إذا كانت v هي سرعة كل جزيء، و Nعدد الجزيئات لكل وحدة حجم، فإن عدد الجزيئات التي تضرب السطح في الثانية هو N·v؛ إذا كانت m كتلة كل جزيء، فإن الكتلة التي تضرب السطح في الثانية هيN·m·v ؛ وزخم كل جزيء من هذه الكتلة هوv ، لذا فإن الزخم المدمّر في الثانية بالاصطدام هو$N \cdot m \cdot v^2$ ، وهذا يقيس الضغط.

لذا إذا كان p هو الضغط:

$$p = N \cdot m \cdot v^2$$

في الحالة المبسطة افترضنا أن جميع الجزيئات تتحرك بسرعة v عمودية على السطح. في حالة غاز في وعاء مغلق، الجزيئات قد تضرب السطح بأي اتجاه؛ ليست كلها عمودية على السطح. لتبسيط الحالة، افترض صندوقًا مكعبًا مملوءًا بالغاز، لكل وجوهه ثلاثة أزواج من السطوح المتعامدة. نفرض أن ثلث الجزيئات تتحرك عموديًا على

كل وجه، فيصبح العدد الذي يجب أخذه في الاعتبار لكل وحدة حجم هو $\frac{1}{3}$ N. بالتالي تصبح الصيغة:

$$p = \tfrac{1}{3} N \cdot m \cdot v^2$$

إذا كانت ρ كثافة الغاز (أي كتلة وحدة الحجم)، فإن $N \cdot m = \rho$. بالتالي، أخيرًا:

$$p = \tfrac{1}{3} \rho v^2$$

أو إذا كان V حجم وحدة الكتلة من الغاز، فإن $\rho \cdot V = 1$، أي $\rho = 1/V$. ومنه:

$$p \cdot V = \tfrac{1}{3} v^2$$

تم الحصول على صيغ مماثلة لأول مرة تقريبًا بواسطة هيراباث حوالي عام 1816، وقدمت في المجلة العلمية *Annals of Philosophy*.

لاحقًا، طور ووترستون النظرية بشكل أكبر، حيث اعتبر أن متوسط مربع السرعة الجزيئية يقيس درجة الحرارة، ومنه يمكن اشتقاق معادلة:

$$p \cdot V = \tfrac{2}{3} N \cdot T$$

وهذا يعبر عن قوانين بويل وغاي-لوساك.

كما ناقش خواص وسائط مكونة من غازين أو أكثر، وخلص إلى أن متوسط مربع السرعة الجزيئية في وسائط مختلطة يتناسب عكسيًا مع

أوزان الجزيئات النوعية، وهو القانون الذي أعاد اكتشافه ماكسويل بعد خمسة عشر عامًا.

من هذا القانون يستنتج قانون أفوجادرو: إذا كانت m_1, m_2 كتل الجزيئات لمجموعتين مختلفتين مختلطة، عند الوصول للحالة المستقرة، تكون $m_1 \cdot v_1^2 = m_2 \cdot v_2^2$ ، أي أن الطاقة الحركية المتوسطة لكل جزيء متماثلة.

ثم أتى ماكسويل بتقديم أول ورقة له بعنوان "توضيحات النظرية الديناميكية للغازات" عام 1859–1860، حيث طبق الأسلوب الإحصائي على الغازات، وقسم الجزيئات إلى مجموعات حسب سرعاتها، وأثبت أنه عند الوصول للحالة المستقرة، يبقى عدد الجزيئات في كل مجموعة ثابتًا، رغم تغير الأفراد من مجموعة لأخرى، وبذلك يمكن حساب توزيع الجزيئات وحساب ضغط الغاز بدقة.

كما تناول حالة مزيج من نوعين من الجزيئات، وأظهر أنه بعد عدد كبير من التصادمات، تصبح الطاقات الحركية للجزيئات متساوية، أي أن الحالة المستقرة تتحقق عندما تمتلك كل جزيئة نفس الطاقة الحركية.

إذن إذا كانت m_1 و m_2 هما كتلتا الجسيمات في المجموعتين على التوالي، و v_1 و v_2 سرعاتهما المتوسطة، فعلينا أن نحصل في النهاية على—

$$\tfrac{1}{2} m_1 v_1^2 = \tfrac{1}{2} m_2 v_2^2$$

هذا هو القانون الثاني من القانونين العظيمين اللذين وضعهما ووتستون

في 1845 و1851، ولكنهما، كما رأينا، ظلّا مجهولين حتى عام 1859، عندما أعادهما ماكسويل.

الآن، عندما تمتزج الغازات تصبح درجات حرارتها متساوية. ومن ثم نستنتج، بكلمات ماكسويل، "أن الحالة الفيزيائية التي تحدد أن تكون درجة حرارة غازين متساوية هي أن تكون الطاقة الحركية المتوسطة لاهتزاز الجزيئات الفردية للغازين متساوية".

وهكذا، كنتيجة لأبحاث ماكسويل الأكثر دقة حول حركة نظام من الجسيمات الكروية، نجد أنه يمكننا مرة أخرى الحصول على المعادلات—

$$T = \frac{1}{2} mv^2$$

$$p = \frac{1}{3} N mv^2 = \frac{2}{3} NT = \frac{2}{3} \rho T/m$$

من هذه النتائج نحصل كما سبق على قوانين بويل، وتشارلز، وأفوجادرو.

مرة أخرى، إذا كانت σ الحرارة النوعية للغاز عند حجم ثابت، فإن كمية الحرارة المطلوبة لرفع درجة حرارة جزيء واحد من الكتلة m بمقدار درجة واحدة ستكون.σ m
وهكذا، عندما يُسخن جزيء، يجب أن تزداد طاقته الحركية بهذا المقدار. ولكن الزيادة في درجة الحرارة، والتي في هذه الحالة تساوي 1°، تُقاس بزيادة الطاقة الحركية للجزيء الواحد. ومن ثم فإن كمية الحرارة المطلوبة لرفع درجة حرارة جزيء واحد من جميع الغازات بمقدار 1° هي نفسها. وبالتالي فإن σ m هي نفسها لجميع الغازات؛

أو، بعبارة أخرى، الحرارة النوعية للغاز تتناسب عكسياً مع كتلة جزيئاته الفردية.

ونظراً لأن عدد الجزيئات لكل وحدة حجم عند ضغط ودرجة حرارة معينين هو نفسه لجميع الغازات، فإن كثافة الغاز تتناسب أيضاً مع كتلة كل جزيء فردي. وهكذا فإن الحرارة النوعية لجميع الغازات تتناسب عكسياً مع كثافتها. وهذا هو القانون الذي اكتشفه عملياً دولونغ وبيتي ليكون صحيحاً تقريباً لعدد كبير من المواد.

في الجزء التالي من البحث، شرع ماكسويل في تحديد عدد التصادمات المتوسطة في وقت محدد، ومن ثم، بمعرفة السرعات، تحديد متوسط المسار الحر للجزيء من حيث حجم الجسيمات وعددها؛ وكانت النتيجة التي تم الحصول عليها تختلف بعض الشيء عن تلك التي حصل عليها كلاوسيوس.

بعد ذلك، أظهر كيف يمكن، عن طريق التجارب على لزوجة الغازات، تحديد طول المسار الحر المتوسط.

توضيح منسوب للبروفيسور بلفور ستيوارت قد يوضح ذلك. لنفترض أن لدينا قطارين يسيران بسرعة ثابتة في اتجاهين متعاكسين على خطوط متوازية، وأن المحركات تعمل بنفس المعدل، مطورة طاقة كافية للتغلب على مقاومة الخط، وما إلى ذلك، والحفاظ على السرعة ثابتة. الآن، لنفترض أن الركاب بدأوا بالقفز من قطار إلى آخر. كل شخص يحمل معه زخم حركته، والذي يكون في الاتجاه المعاكس للقطار الذي يقفز إليه؛ والنتيجة هي أن زخم كل قطار يقل بهذه العملية؛ أي أن سرعات القطارين تتناقص؛ ويبدو كما لو أن قوة

احتكاك تعمل بينهما. يقترح ماكسويل أن عملية مماثلة ستفسر اللزوجة الظاهرة للغازات.

افترض تيارين من الغاز، يتحركان في اتجاهين متعاكسين أحدهما فوق الآخر؛ ويُلاحظ أنه في كل حالة تتحرك طبقات الغاز بالقرب من السطح الفاصل أبطأ من تلك في الداخل؛ هناك على ما يبدو قوة احتكاك بين التيارين على هذا السطح، تميل إلى تقليل سرعتهما النسبية. تفسير ماكسويل لذلك هو أن الجسيمات من التيار الواحد تدخل الآخر، وتحمل معها زخمها الحركي؛ وبالتالي قرب هذا السطح يقل زخم كل تيار، تماماً كما يقل زخم القطارات عند قفز الركاب عبرها. يُعزى الاحتكاك الداخلي أو اللزوجة إلى انتشار الزخم عبر هذا السطح المشترك. التأثير لا يخترق الغاز بعيداً، لأن الجسيمات سرعان ما تكتسب سرعة التيار الذي دخلت إليه.

الآن، معدل انتشار الزخم سيقيس القوة الاحتكاكية، ويعتمد على متوسط المسار الحر للجسيمات. إذا كان هذا المسار كبيراً، بحيث يمكن للجسيم أن يخترق مسافة كبيرة في الغاز الآخر قبل وقوع تصادم وتغيير حركته، فإن اللزوجة ستكون كبيرة؛ أما إذا كان المسار الحر صغيراً، فسيكون العكس صحيحاً. وهكذا، من الممكن الحصول على علاقة بين المسار الحر المتوسط ومعامل اللزوجة، ومن هذا، إذا كان معامل اللزوجة معروفاً، يمكن إيجاد قيمة المسار الحر المتوسط.

كان ماكسويل، في الورقة قيد النقاش، أول من فعل ذلك، وباستخدام القيمة التي وجدها البروفيسور ستوكس لمعامل اللزوجة، حصل على طول المسار الحر لجزيئات الهواء 447000/1 من البوصة، بينما

وجد أن عدد التصادمات في الثانية لكل جزيء يبلغ حوالي 8,077,200,000.

علاوة على ذلك، ظهر من نظريته أن معامل اللزوجة يجب أن يكون مستقلاً عن عدد جزيئات الغاز الموجودة، بحيث لا يتغير بتغيير الكثافة. وصف ماكسويل هذه النتيجة بأنها مذهلة، وأجرى سلسلة تجارب مفصلة بعد بضع سنوات لاختبارها. سبب هذه النتيجة يتضح إذا تذكرنا أنه عند انخفاض الكثافة، يزداد المسار الحر المتوسط؛ نسبياً، بالنسبة لإجمالي عدد الجزيئات، يزيد عدد الجزيئات التي تعبر السطح في وقت محدد. ويظهر من نتيجة ماكسويل أن هذه الزيادة النسبية تكون بحيث يظل العدد الإجمالي الذي يعبر السطح ثابتاً. وبالتالي، يبقى الزخم الذي يُنقل عبر كل وحدة مساحة في الثانية نفسه، بالرغم من انخفاض الكثافة.

نتيجة أخرى من نفس التحقيق هي أن معامل اللزوجة يتناسب مع السرعة المتوسطة للجزيئات. ونظراً لأن الحرارة المطلقة تتناسب مع مربع السرعة، فإن معامل اللزوجة يتناسب مع الجذر التربيعي للحرارة المطلقة.

الجزء الثاني من البحث يتناول عملية انتشار نوعين أو أكثر من الجسيمات المتحركة فيما بينها. إذا وُضع غازان مختلفان في وعائين مفصولين بحاجز مسامي مثل قطعة فخار غير مزجج، أو موصلين بواسطة أنبوب ضيق، فقد أظهر غراهام أنه بعد مرور وقت كافٍ، تمتزج الغازات معاً. وتحدث نفس العملية عندما توضع غازان بكثافات مختلفة في وعاء واحد. في البداية، قد يكون الغاز الأكثر كثافة في

الأسفل والأقل كثافة في الأعلى، ولكن بعد فترة يتم توزيع الغازات بشكل متساوٍ في جميع الأنحاء.

حاول ماكسويل حساب معدل انتشار الغازات من نظريته في هذه الحالات. كانت ظروف معظم تجارب غراهام معقدة جداً لتسمح بالمقارنة المباشرة مع النظرية، ومن النظرية تبين أن هناك علاقة بين متوسط المسار الحر ومعدل الانتشار. ومع ذلك، وُجدت تجربة واحدة يمكن جعل ظروفها موضوع حساب، ومن خلالها حصل ماكسويل على قيمة المسار الحر المتوسط للهواء 389000/1 من البوصة. الرقم كان قريباً بما فيه الكفاية من القيمة المستخرجة من اللزوجة ليؤكد بعض الشيء نظريته.

ومع ذلك، بعد بضع سنوات، انتقد كلاوسيوس تفاصيل هذا الجزء من البحث، وأقر ماكسويل، في مذكرته لعام 1866، بأن الحساب كان خاطئاً. المبادئ الأساسية ظلت دون تغيير، الجزيئات تمر من غاز إلى آخر، وهذا يشكل عملية الانتشار.

الآن، افترض وجود مجموعتين من الجسيمات على تماس بحيث أن متوسط الطاقة الحركية لإحدى المجموعتين يختلف عن الأخرى؛ عندها ستكون درجات حرارة المجموعتين مختلفة. ستنتشر هاتان المجموعتان فيما بينهما، وستحمل الجسيمات المنتشرة معها طاقتها الحركية، والتي ستنتقل تدريجياً من الجسيمات ذات الطاقة الأعلى إلى تلك ذات الطاقة الأقل، حتى تتساوى الطاقة الحركية المتوسطة في جميع الأنحاء. ولكن الطاقة الحركية للانتقال هي حرارة الجسيمات.

هذا الانتشار للطاقة الحركية هو انتشار للحرارة عن طريق التوصيل، وهنا لدينا النظرية الميكانيكية لتوصيل الحرارة في الغاز.

حصل ماكسويل على تعبير، ولكنه عدله لاحقاً، للتوصيل الحراري للغاز من حيث المسار الحر المتوسط. تبين من هذا أن التوصيل الحراري للهواء كان حوالي 7000/1 من توصيل النحاس.

وهكذا، فإن انتشار الغازات، ولزوجة الغازات، وتوصيل الحرارة في الغازات، جميعها مرتبطة بانتشار الجسيمات التي تحمل معها زخمها وطاقة حركتها؛ ويمكن الحصول على قيم المسار الحر المتوسط من الملاحظات على أي من هذه الخصائص.

في الجزء الثالث من بحثه، درس ماكسويل عواقب افتراض أن الجسيمات ليست كروية. في هذه الحالة، من المرجح أن تصادماتها تخلق حركة دوران للجسيمات. اتجاه القوة المؤثرة على أي جسيم عند الاصطدام لا يمر بالضرورة عبر مركزه؛ وبالتالي، بتأثير الاصطدام، تتغير سرعة مركزه، وبالإضافة إلى ذلك، يتم تدوير الجسيم. لذا، جزء من طاقة الجسيم يظهر على شكل طاقة انتقالية لمركزه، والباقي على شكل طاقة دورانية للجسيم حول مركزه.

يستنتج من عمل ماكسويل أنه بالنسبة لكل جسيم، سيكون متوسط قيمة هذين الجزأين من الطاقة متساوياً. الطاقة الكلية ستكون نصفها انتقالية ونصفها دورانية.
هذا المبدأ، بصيغة أكثر عمومية أعطيت له لاحقاً، أدى إلى كثير من النقاش، وسيُعاد النظر فيه لاحقاً. حالياً، سنفترض صحته. وقد أشار كلاوسيوس بالفعل إلى أن بعض الطاقة يجب أن تكون دورانية ما لم

تكن الجزيئات كرات ناعمة، وقدم بعض الأسباب للاعتقاد بأن نسبة الطاقة الكلية إلى طاقة الانتقال في حالة مستقرة تكون ثابتة. يظهر ماكسويل أنه بالنسبة للأجسام الصلبة، يكون هذا الثابت 2. دعونا نرمز له حالياً بالرمز .β إذن، إذا كانت الطاقة الانتقالية لجزيء هي $½\ m$ v^2، فإن طاقته الكلية هي.$½\ \beta\ m\ v^2$

تبقى درجة الحرارة مقاسة بالطاقة الانتقالية، أو$½\ m\ v^2$ ؛ بينما الحرارة تعتمد على الطاقة الكلية. إذاً، إذا مثلنا H كمية الحرارة— مقاسة كطاقة—المحتواة في جزيء واحد، و Tدرجة حرارته، يكون لدينا—

$$H = \beta T$$

من هذا يمكن الاستنتاج، إذا مثلنا γ نسبة الحرارة النوعية للغاز عند ضغط ثابت إلى الحرارة النوعية عند حجم ثابت، أن:

$$\beta = ⅔\ 1/(\gamma-1)$$

بالنسبة للهواء وبعض الغازات الأخرى، تبين أن قيمة γ تساوي 1.408. ومن هذا يتبع أن .$\beta = 1.634$ نظرية ماكسويل تتطلب أن تكون للجسيمات الناعمة الصلبة، تقريباً كروية الشكل، قيمة β حوالي 2، ومن ثم استنتج: "لقد أظهرنا أن نظاماً من هذه الجسيمات لا يمكن أن يحقق العلاقة المعروفة بين الحرارة النوعية للغازات".

وبما أن هذه العبارة صُدرت، أُجريت تجارب أكثر على قيمةγ ، ولم تكن مساوية لـ 1.408 لجميع الغازات. وبالتالي، قيمة β تختلف بين الغازات المختلفة.

من المهم ملاحظة أن قيمة β التي تم العثور عليها للهواء تقريبية جداً، حوالي 1.66 أو 3/5.

بالنسبة لبخار الزئبق، أظهرت تجارب كوندت أن $\gamma = 1.33$ أو 3/4، وبالتالي $\beta = 1$. إذن كل طاقة جسيم بخار الزئبق انتقالية، وتصرفه في هذا الصدد متوافق مع افتراض أن جسيم بخار الزئبق كرة ناعمة.

النتيجتان الرئيسيتان لهذه النظرية اللتان يمكن التحقق منهما تجريبياً بسهولة أكبر كانتا: (1) أن لزوجة الغاز مستقلة عن كثافته، و(2) أنها تتناسب مع الجذر التربيعي للحرارة المطلقة.

أما العمل التالي المرتبط بالنظرية، فكان محاولة لاختبار هذه النتائج، ونُشر وصف للتجارب في "المعاملات الفلسفية" لعام 1865، في ورقة عن "لزوجة أو الاحتكاك الداخلي للهواء والغازات الأخرى"، وهي تشكل محاضرة بيكيرية لذلك العام.

تم إثبات النتيجة الأولى بالكامل. وأظهر أن قيمة معامل اللزوجة "نفسها للهواء عند 0.5 بوصة و30 بوصة ضغط، بشرط أن تبقى درجة الحرارة نفسها".

كما تبين أن اللزوجة تعتمد على درجة الحرارة، وبدت نتائج التجارب أنها تقارب التناسب مع الحرارة المطلقة. فعند درجتين 185° فهرنهايت و51° فهرنهايت، كانت نسبة معاملي اللزوجة 1.2624؛ ونسبة الحرارتين، كل واحدة مقاسة من الصفر المطلق، هي 1.2605.

إذن هذه النتيجة لا تتفق مع الفرضية التي تفترض أن الغاز يتكون من جزيئات كروية تعمل فقط عن طريق التصادم، لأنه إذا كان الأمر كذلك، كما رأينا، فإن المعامل يعتمد على الجذر التربيعي للحرارة المطلقة. ولكن نتيجة ماكسويل، التي تربط اللزوجة بالأساس الأول للحرارة المطلقة، لم تؤكدها دراسات أخرى. وفقاً لها، يجب أن تكون العلاقة بينμ ، معامل اللزوجة عند درجة$t°$ ، وμ_o ، المعامل عند الصفر، هي—

$$\mu = \mu_o (1 + 0.00365 t)$$

أحدث نتائج البروفيسور هولمان تعطي—

$$\mu = \mu_o (1 + 0.00275 t - 0.00000034 t^2)$$

ونتائج مشابهة أعطاها O. E. Meyer و Pulujو .Obermeyerإذن معامل 0.00365 لماكسويل كبير جداً، بينما 0.00182، المعامل المحسوب بافتراض أن اللزوجة تتناسب مع الجذر التربيعي للحرارة، سيكون صغيراً جداً.

وبالتالي، تظل حقيقة أن قوانين لزوجة الغازات لا يمكن تفسيرها بافتراض تصادم الكرات الصلبة؛ ولكن بعض الاستنتاجات التي استخلصها ماكسويل في ورقته التالية من فرضيته بتناسبها مع الأساس الأول للحرارة المطلقة تحتاج إلى تعديل.

ومن الواضح من تجاربه الموصوفة أعلاه أن فرضية التصادم البسيط للأجسام المرنة لا تفسر كل الظواهر المرصودة. وبناءً عليه، تناول

ماكسويل المشكلة بشكل أوسع في 1866 في ورقته عن "النظرية الديناميكية للغازات."

فيها اعتبر الجزيئات في الغاز ليست كرات مرنة ذات نصف قطر محدد، بل أجسام صغيرة، أو مجموعات من الجزيئات الصغيرة، تتنافر فيما بينها بقوة يتجه خط تأثيرها تقريباً عبر مركز الجاذبية للجزيئات، ويُقاس حجمها تقريباً بواسطة دالة المسافة بين مراكز الجاذبية.
وقال: "لقد قمت بهذا التعديل للنظرية نتيجة لنتائج تجاربي على لزوجة الهواء عند درجات حرارة مختلفة، وقد استنتجت من هذه التجارب أن القوة التنافرية تتناسب عكسياً مع القوة الخامسة للمسافة".

نظراً لأن الملاحظات الأحدث أظهرت أن النتائج العددية لعمل ماكسويل، الذي يربط اللزوجة والحرارة، خاطئة، فإن هذا الاستنتاج الأخير لا ينطبق؛ قانون القوة للقوة الخامسة لن يعطي العلاقة الصحيحة بين اللزوجة والحرارة.

حتى ماكسويل نفسه لاحقاً، في ورقته "عن الإجهادات في الغازات المخففة" عام 1879، أدرك ذلك؛ ومع ذلك التزم بقانون القوة الخامسة لأنه يؤدي إلى تبسيط مهم في المعادلات التي يتم التعامل معها.

تُعد ورقة 1866 مهمة أساساً لأنها تحتوي لأول مرة على تطبيق الأساليب الديناميكية العامة على مشاكل الجزيئات. ويتم دراسة قانون توزيع السرعات بين الجزيئات، وتوصل إلى نتيجة متطابقة عملياً مع تلك الخاصة بالكرات المرنة. عند الحصول على هذا الاستنتاج، يُفترض أن توزيع السرعات موحد في جميع الاتجاهات حول أي

نقطة، بغض النظر عن العمليات التي تحدث في الغاز. إذا، على سبيل المثال، كانت الحرارة مختلفة في نقاط مختلفة، فإن جميع الاتجاهات ليست متساوية الاحتمال لسرعة معينة. لذلك، تعبير ماكسويل عن عدد الجزيئات التي تمتلك سرعة معينة في أي لحظة ينطبق فقط على الحالة الدائمة التي يكون فيها توزيع الحرارة متساوياً. وعند التعامل، على سبيل المثال، مع توصيل الحرارة، يلزم تعديل التعبير. وقد أشار بولتزمان إلى ذلك.

في ورقة 1866، يطبق ماكسويل نتائجه المعممة على التوزيع النهائي لغازين تحت تأثير الجاذبية، وتوازن الحرارة بين غازين، وتوزيع الحرارة في عمود عمودي. وهذه النتائج، كما يقول، مستقلة عن قانون القوة بين الجزيئات.

ويتم التعامل مع الأسباب الديناميكية للانتشار، واللزوجة، وتوصيل الحرارة، وهذه تشمل قانون القوة.

كما يتضح من البحث أنه، وفقاً للفرضيات الأساسية، إذا اختلط نوعان من الغازات، فإن الفرق بين متوسط الطاقة الحركية الانتقالية لكل نوع يقل بسرعة نتيجة التفاعل بين النوعين. وبالتالي، تميل الطاقة الحركية المتوسطة للانتقال إلى أن تصبح متساوية لكل نوع من الغاز، وكما سبق، فإن هذه الطاقة المتوسطة للانتقال تقيس درجة الحرارة.

الجزيء في النظرية هو جزء من الغاز يتحرك كجسم واحد. قد يكون مجرد نقطة، مركز قوة له قصور ذاتي، قادر على أداء شغل أثناء فقد السرعة. قد تحتوي كل جزيء أيضاً على أنظمة من عدة مراكز قوة مرتبطة ببعضها عبر تأثيراتها المتبادلة. مرة أخرى، قد يكون الجزيء

جسماً صلباً صغيراً ذا شكل محدد؛ في هذه الحالة، كما يشير ماكسويل، يجب إدخال مجموعة جديدة من القوى التي تربط أجزاء كل جزيء: يجب أن يكون لدينا نظرية جزيئية من الدرجة الثانية. في كل الأحوال، أبسط افتراض هو أن الجزيء يتكون من سلسلة من الأجزاء التي تلتصق ببعضها، لكنها قادرة على الحركة النسبية فيما بينها.

في هذه الحالة، تتكون الطاقة الحركية للجزيء من طاقة مركز ثقله، بالإضافة إلى طاقة أجزائه بالنسبة لمركز ثقله.

كما رأينا، قدم كلاوسيوس أسباباً للاعتقاد بأن نسبة الطاقة الكلية للجزيء إلى طاقة الانتقال لمركز ثقله تميل إلى الثبات. وقد استخدمنا βللدلالة على هذا الثابت. وبالتالي، بينما تُقاس درجة الحرارة بواسطة الطاقة الحركية المتوسطة للانتقال لمركز الجاذبية لكل جزيء، فإن الحرارة المحتواة في الجزيء هي طاقته الكلية، وتساوي β ضعف هذه الكمية. ومن ثم، تنطبق الاستنتاجات حول الحرارة النوعية وما إلى ذلك كما ذكرنا، وبشكل خاص، إذا كانت γ نسبة الحرارة النوعية عند ضغط ثابت إلى الحرارة النوعية عند حجم ثابت، فإن—

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{1}{(\gamma-1)}$$

نظرية ماكسويل حول توزيع الطاقة الحركية بين نظام من الجزيئات، كما أعطاها في 1866، تنطبق على الطاقة الحركية للانتقال لمركز الجاذبية لكل جزيء. بعد عامين، وسع د. بولتزمان هذه النظرية (ضمن حدود معينة) لتشمل أجزاء الجزيء المكونة له. وفقاً لماكسويل، تميل الطاقة الحركية المتوسطة لمركز الجاذبية لكل جزيء

إلى التساوي. وفقاً لبولتزمان، تميل الطاقة الحركية المتوسطة لكل جزء من الجزيء إلى أن تصبح متساوية.

في آخر ورقة له حول هذا الموضوع“) حول مبرهنة بولتزمان لتوزيع الطاقة في نظام من النقاط المادية”، Camb. Phil. Trans., XII)، تناول ماكسويل هذه المسألة. كان واتسون قد قدم برهانًا عليها في عام 1876 يختلف عن برهان بولتزمان، لكنه كان لا يزال مقيدًا بالافتراض القائل بأن الزمن الذي يقضيه الجسيم في مواجهة جسيمات أخرى يكون صغيرًا جدًا مقارنة بالزمن الذي لا يوجد خلاله أي تأثير محسوس بينه وبين الجسيمات الأخرى، وأيضًا أن الزمن الذي يكون فيه الجسيم ضمن مسافة أكثر من جسيم واحد يمكن إهماله.

يؤكد ماكسويل أن برهانه خالٍ من أي من هذه القيود. يمكن للنقاط المادية أن تتفاعل مع بعضها البعض عند جميع المسافات، ووفق أي قانون يتفق مع حفظ الطاقة؛ ويمكن أن تتأثر أيضًا بقوى خارجية على النظام، بشرط أن تكون هذه القوى متوافقة مع هذا القانون.

الافتراض الوحيد اللازم للبرهان المباشر هو أن النظام، إذا تُرك لحاله في حالته الحركية الفعلية، سيمر عاجلًا أم آجلًا بكل حالة متوافقة مع حفظ الطاقة.

في هذه الورقة، وجد ماكسويل بطريقة عامة جدًا تعبيرًا عن عدد الجزيئات التي تمتلك في أي لحظة سرعة معينة، وهذا التعبير، عند تبسيطه وفق افتراضات الأوراق السابقة، يعود إلى الشكل المعروف بالفعل. كما أظهر أن متوسط الطاقة الحركية المرتبطة بأي متغير من المتغيرات التي تحدد نظامه هو نفسه لجميع المتغيرات الأخرى للنظام.

وبالتالي، وفق هذه المبرهنة، إذا اعتبرنا كل جزيء جسمًا صلبًا صغيرًا، فستكون ستة متغيرات مطلوبة لتحديد موقع كل جزيء، حيث تحدد ثلاث متغيرات موقع مركز الثقل للجزيء، بينما تحدد الثلاثة الأخرى موضع الجسم بالنسبة لمركز ثقله. إذا تم اختيار المتغيرات الستة بشكل مناسب، يمكن التعبير عن الطاقة الحركية كمجموع ست مربعات، كل مربع يمثل متغيرًا واحدًا. وفقًا للمبرهنة، الجزء من الطاقة الحركية المرتبط بكل مربع متساوٍ. وبالتالي، تكون الطاقة الكلية ستة أضعاف الطاقة الناتجة عن أي متغير واحد. الطاقة الحركية للانتقال (الترجمة) تكون ثلاث مرات أكبر من الطاقة الناتجة عن كل متغير، لأنها تشمل المتغيرات الثلاثة التي تحدد موقع مركز الثقل. لذا، إذا رمزنا بـ K للطاقة الحركية الناتجة عن متغير واحد، تكون الطاقة الكلية K6، والطاقة الانتقالية K3؛ وبالتالي، في هذه الحالة:

$$\beta = 6K / 3K = 2$$

أو، إذا افترضنا أن الجزيء يحتاج m متغيرات لتحديد موقعه بالنسبة لمركز ثقله، بما أن 3 متغيرات مطلوبة لتثبيت مركز الثقل، فإن العدد الكلي للمتغيرات التي تحدد موقع الجزيء هو3 + m ، ويقال إن له m 3 +درجات حرية. وبالتالي، في هذه الحالة، تكون طاقته الكلية + m) K (3وطاقته الانتقالية K3، ونجد:

$$\beta = (m + 3)/3$$

ومن ثم:

$$\gamma = 1 + 2/(m + 3) = 1 + 2/n$$

إذا كان n هو عدد درجات الحرية للجزيء.

وبالتالي، إذا كانت هذه المبرهنة لبولتزمان-ماكسويل صحيحة، فإن الحرارة النوعية للغاز تعتمد فقط على عدد درجات الحرية لكل جزيء منه. بالنسبة للأجسام الصلبة الصلبة، يجب أن يكون n مساويًا لـ 6، ومن ثم .1.333 = γ والحقيقة أن هذا ليس قيمة γ لأي من الغازات المعروفة تمثل صعوبة أساسية في قبول النظرية الكاملة.

وقد أشار بولتزمان إلى أنه إذا كان5 = n ، فإن .1.40 = γ وهذه القيمة تتفق إلى حد ما مع القيمة التي وجدت تجريبيًا للهواء والأكسجين والنيتروجين وعدة غازات أخرى. وسنعود إلى هذه النقطة لاحقًا.

ربما لا توجد نتيجة في مجال العلوم الفيزيائية في السنوات الأخيرة أكثر نقاشًا من المبرهنتين الأساسيتين للنظرية الجزيئية التي ندين بها لماكسويل وبولتزمان.

والنتيجتان المعنيتان هما:

1. التعبير عن عدد الجزيئات التي تمتلك في أي لحظة سرعة معينة.
2. الاقتراح بأن الطاقة الحركية موزعة في النهاية بالتساوي بين جميع المتغيرات التي تحدد النظام.

فيما يتعلق بالنقطة (1)، أظهر ماكسويل أن قانون الخطأ الذي اقترحه كان شرطًا ممكنًا للاستقرار. إذا كانت السرعات موزعة وفق قانون

الخطأ في أي لحظة، فإن هذا التوزيع سيكون دائمًا. لكنه لم يثبت أن هذا التوزيع هو الوحيد الذي يمكن أن يحقق جميع شروط المسألة.

أما إثبات أن هذا القانون شرط ضروري وكافٍ للاستقرار فقد قدمه بولتزمان أولًا للغاز الأحادي الذرة في 1872، ولمزيج من هذه الغازات في 1886، ولغاز متعدد الذرات في 1887. وقدمت براهين أخرى لاحقًا بواسطة واتسون وبربوري. ومن الجدير بالذكر أن مناقشة كمال هذه البراهين لا تزال مستمرة.

يتضمن تقرير الجمعية البريطانية لعام 1894 مساهمة هامة في هذا الموضوع على شكل تقرير أعده السيدG.H. Bryan ، وقد بدأ بمناقشته في أكسفورد واستمرت هذه المناقشة في صفحات مجلة Natureوأماكن أخرى منذ ذلك الحين.

أوضح السيد Bryan أولًا طبيعة أنظمة الجزيئات التي تنطبق عليها النتائج، وناقش نقاط صعوبة مختلفة في البرهان.

وقد صاغ الدكتور Larmor المبرهنة، والتي يمكن أن تُستنتج منها النقطة (1) على أنها استنتاج بسيط، كما يلي:

"هناك دالة موجبة تنتمي لمجموعة من الجزيئات، وعندما تستقر هذه الجزيئات في حالة مستقرة – على المتوسط المستمد من عدد كبير من التكوينات – تحافظ على اتجاه تنازلي ثابت. الحالة المستقرة لماكسويل-بولتزمان هي تلك التي بلغت فيها هذه الدالة أدنى قيمة لها في النهاية، وبالتالي فهي حالة مستقرة فريدة، مع مراعاة أن هذا مجرد اقتراح للمتوسطات المستمدة من عدد كبير من الحالات التي لا يحفظ

فيها شيء خلال التصادمات سوى الطاقة، وأنه قد توجد ظروف استثنائية قليلة العدد يمكن أن يكون فيها الاتجاه مؤقتًا في الاتجاه الآخر".

يبدو أن هذه المبرهنة، عند تطبيقها على حالات الحركة مثل حركة الغاز عند درجة حرارة ثابتة محصورًا في غلاف صلب غير قابل لنقل الحرارة، مثبتة. لذلك، في هذه الحالة، يكون قانون ماكسويل-بولتزمان هو القانون الوحيد الممكن.

لكن سواء كان هذا صحيحًا أم لا، فإن القانون الذي قدمه ماكسويل أولًا هو أحد القوانين الممكنة، والتقدم في العلوم الجزيئية الناتج عن إدخاله هائل.

ننتقل الآن إلى النتيجة الثانية، وهي التوزيع المتساوي للطاقة بين جميع درجات الحرية لكل جزيء. أشار اللورد كلفن إلى وجود خلل في برهان ماكسويل، لكن بولتزمان أوضح (Philosophical Magazine، مارس 1893 (كيف يمكن تصحيح هذا الخلل بسهولة، ويمكن القول أنه في جميع الحالات التي ينطبق فيها قانون بولتزمان-ماكسويل لتوزيع السرعات، ينطبق أيضًا قانون ماكسويل لتوزيع الطاقة بالتساوي.

درس السيد Bryan ثلاث حالات يفشل فيها قانون التوزيع للجزيئات الصلبة:

1. عندما تمتلك الجزيئات جميعها، بالإضافة إلى سرعات اهتزازها، سرعة انتقال مشتركة في اتجاه ثابت.

2. عندما يتحرك الغاز بحركة دوران منتظمة حول محور ثابت.

3. عندما يمتلك كل جزيء محور تماثل. في هذه الحالة الأخيرة، تمر القوى المؤثرة أثناء التصادم بالضرورة عبر محور التماثل، وبالتالي تبقى السرعة الزاوية لأي جزيء حول هذا المحور ثابتة، ويظل عدد الجزيئات التي تمتلك سرعة زاوية معينة ثابتًا طوال الحركة، ولن يؤخذ الجزء من الطاقة الحركية الذي يعتمد على هذا المكون في الاعتبار عند التعامل مع التوزيع المتساوي للطاقة بين درجات الحرية المختلفة.

مثل هذا الجزيء له خمس، وليس ست درجات حرية؛ ثلاث كميات مطلوبة لتحديد موقع مركز الثقل، واثنتان لتثبيت محور التماثل.

في هذه الحالة، كما يشير بولتزمان، في التعبير عن نسبة الحرارة النوعية: يجب أن يكون $n = 5$ ، ومن ثم:

$$\gamma = 1 + 2/n = 1 + 2/5 = 1.4$$

وهذا يتفق إلى حد ما مع القيمة التجريبية للهواء وعدة غازات دائمة أخرى.

وبالتالي، في الحالات التي نعتبر فيها كل ذرة جسمًا صلبًا واحدًا، يبدو أن مبرهنة بولتزمان-ماكسويل تعطي حلاً فريدًا، وأن قانون ماكسويل لتوزيع الطاقة يتفق مع النتائج التجريبية إلى حد معقول.

حتى لو لم نتمكن من التقدم أكثر – ويجب الاعتراف بأن الصعوبات في سبيل التقدم أكبر – يمكن القول أن التقدم الذي تحقق بالفعل يعود

فضل كبير منه إلى ماكسويل. كلا القانونين، في حالة الكرات المرنة، موجودان في ورقته الأولى عام 1860؛ وبينما ندين بالتمييز لبولتزمان في تعميمهما المبكر، وإثبات تفرد الحل ضمن القيود المناسبة، ساهمت ورقة ماكسويل الأخيرة بشكل كبير في ترسيخ هذا الموقف. ليس فقط الأسس، بل جزء كبير من بنية العلم الجزيئي قام بها ماكسويل.

الصعوبات في سبيل التقدم، كما ذكرنا، هائلة. درس بولتزمان في إحدى أوراقه خصائص جزيء غاز مركب، قد يتكون من عدة ذرات وربما ذرات أثير مرتبطة بها، وخلص إلى أن مثل هذا الجزيء سيتصرف في حركته التقدمية وتصادماته مع الجزيئات الأخرى تقريبًا كجسم صلب. لكن كما يقول السيد Bryan: "حالة الجزيء متعدد الذرات، الذي تستطيع ذراته الاهتزاز بالنسبة لبعضها البعض، تمثل مجالًا مثيرًا للبحث والتأمل. هل يظل توزيع بولتزمان فريدًا، أم توجد توزيعات دائمة أخرى تتوزع فيها الطاقة الحركية بشكل غير متساوٍ؟"

كذلك، يكشف لنا المطياف عن اهتزازات الأثير، المرتبطة بطريقة ما باهتزازات جزيئات الغاز الذي نراقب طيفه. يبدو واضحًا أن قانون التوزيع المتساوي لا ينطبق على هذه الاهتزازات، ومع ذلك إذا افترضنا أن اهتزازات الأثير ناتجة عن اهتزازات فعلية للذرات التي تشكل الجزيء، فلماذا لا ينطبق القانون؟ أين يأتي الشرط الذي يؤدي إلى فشل البرهان؟ أو، كما اقترح، هل الحقيقة أن الطيف المعقد للغاز يمثل حدود سلسلة فورييه، تتحلل فيها بعض الاهتزازات المعقدة للذرات على الأثير؟ أم أن الطيف ناتج ببساطة عن اهتزازات كهرومغناطيسية على سطح الجزيئات – اهتزازات تحدد فترة حدوثها بشكل رئيسي بحجم وشكل الجزيء، ولكن تشارك فيها الذرات المكونة

له؟ هناك صعوبات كبيرة أمام أي من هذين التفسيرين، لكن يجب ألا يمنعنا هذا من تقدير عظمة أعمال ماكسويل.

هناك ورقة أخرى مهمة وعدد من المقالات القصيرة التي تجدر الإشارة إليها.

ينطبق قانون بولتزمان-ماكسويل فقط على الحالات التي تكون فيها درجة الحرارة منتظمة في جميع أرجاء النظام. في ورقة نشرت في Philosophical Transactionsعام 1879، بعنوان "الإجهادات في الغازات المخففة الناتجة عن تفاوتات درجة الحرارة"، تناول ماكسويل، من بين أمور أخرى، نظرية المقياس الشعاعي .(radiometer) أظهر أن الحركة الملاحظة لن تحدث إلا إذا كان الغاز، عند ملامسته لسطح صلب، قادرًا على الانزلاق على سطح الصلب بسرعة محدودة بين الأماكن التي تختلف فيها درجة الحرارة؛ وفي ملحق للورقة أثبت أنه وفقًا لبعض الافتراضات المتعلقة بطبيعة تماس الصلب والغاز، سيكون هناك تدفق للغاز على السطح من الأماكن الباردة إلى الأماكن الساخنة حتى عند ثبات الضغط.

من بين أوراقه الأقل أهمية المرتبطة بالنظرية الجزيئية، يمكن ذكر محاضرة عن "الجزيئات" التي ألقاها في اجتماع الجمعية البريطانية في برادفورد؛ و"أوراق ماكسويل العلمية"، المجلد الثاني، ص. 361؛ وأخرى عن "التركيب الجزيئي للأجسام"، Scientific Papers، المجلد الثاني، ص. 418.

في هذه الأخيرة، وأيضًا في مراجعة في مجلة Nature لكتاب فان دير فالز عن "استمرارية الحالات الغازية والسائلة"، يشرح ويناقش

ماكسويل معادلة كلاوسيوس للمتوسط(virial equation) ، والتي يتم من خلالها تفسير انحرافات الغازات الدائمة عن قانون بويل. تقدم المحاضرة شرحًا واضحًا، بأسلوب ماكسويل المميز، للتقدم الذي أحرز في النظرية الحركية حتى تاريخ إلقائها، وتوضح الصعوبات التي تواجهها، والتي رأى ماكسويل أن أبرزها هو القيم المعروفة لنسبة الحرارة النوعية.

في المقالات "التركيب الذري للأجسام" و"الانتشار"، في الطبعة التاسعة منEncyclopedia Britannica ، نجد آراء ماكسويل الأخيرة حول الافتراضات الأساسية للنظرية الجزيئية.

يحتوي كتابه المدرسي عن "الحرارة" على بعض التطورات الأخرى للنظرية. وبالأخص، يوضح كيف ترتبط استنتاجات القانون الثاني للديناميكا الحرارية بحقيقة أن حدة حواسنا لا تسمح لنا بالتعامل مع الجزيئات الفردية.

الأعمال الموصوفة في الفصول السابقة كانت كافية لتضمن لماكسويل مكانة متميزة بين من ساهموا في تقدم معرفتنا؛ وما زال يتعين وصف أعظم أعماله، وهي نظريته في الكهرباء والمغناطيسية.

الفصل التاسع

العمل العلمي — النظريات الكهربائية

كانت أول ورقة كهربائية لكليرك ماكسويل — تلك المتعلقة بـ"خطوط القوة" لفاراداي — قد قُرئت في الجمعية الفلسفية في كامبريدج في 10 ديسمبر 1855، والجزء الثاني في 11 فبراير 1856. وكان المؤلف حينها حاصلاً على درجة البكالوريوس في الآداب، ويبلغ من العمر ثلاثة وعشرين عامًا فقط، وقد مر أقل من عام على حصوله على الدرجة.

تبدأ كلمات الورقة كما يلي (الأوراق العلمية، المجلد الأول، ص. 155):

"يبدو أن الحالة الراهنة للعلم الكهربائي غير مواتية للتأمل. فقد تم استنتاج قوانين توزيع الكهرباء على سطح الموصلات تحليليًا من التجارب؛ بعض أجزاء النظرية الرياضية للمغناطيسية قد أُثبتت، بينما لا تزال البيانات التجريبية مفقودة في أجزاء أخرى؛ وقد تم تقليص نظرية توصيل الجلفانية، ونظرية التجاذب المتبادل للموصلات، إلى صيغ رياضية، لكنها لم تتصل ببقية أجزاء العلم. لا يمكن الآن تقديم أي نظرية كهربائية، إلا إذا أظهرت العلاقة، ليس فقط بين الكهرباء الساكنة والكهرباء المتحركة، بل بين التجاذب والتأثيرات الحثية للكهرباء في كلا الحالتين. يجب أن تلبي هذه النظرية بدقة تلك القوانين، التي الشكل الرياضي لها معروف، وأن توفر وسيلة

لحساب التأثيرات في الحالات الحدية حيث تكون الصيغ المعروفة غير قابلة للتطبيق.

لذلك، لفهم متطلبات العلم، يجب على الطالب أن يتعرف على كمية كبيرة من الرياضيات المعقدة، والتي حفظها في الذاكرة قد يعيق التقدم. وبالتالي، فإن العملية الأولى في دراسة العلم بشكل فعّال يجب أن تكون تبسيطًا وتقليصًا لنتائج التحقيقات السابقة إلى شكل يمكن للعقل استيعابه. يمكن أن يتخذ هذا الشكل صيغة رياضية بحتة أو فرضية فيزيائية. في الحالة الأولى نفقد تمامًا النظر إلى الظواهر المراد تفسيرها؛ وبالرغم من أنه يمكننا تتبع نتائج قوانين معينة، لا يمكننا الحصول على رؤية أوسع للعلاقات في الموضوع. أما إذا اعتمدنا فرضية فيزيائية، فإننا نرى الظواهر من خلال وسيلة، ونكون عرضة للعمى تجاه الحقائق والاندفاع في الافتراضات التي يشجع عليها التفسير الجزئي. لذلك يجب علينا اكتشاف طريقة تحقيق تسمح للعقل في كل خطوة بالاستيلاء على تصور فيزيائي واضح، دون التزام بأي نظرية مستمدة من العلم الفيزيائي الذي اقتبس منه هذا التصور، بحيث لا ينحرف عن الموضوع في متابعة التعقيدات التحليلية، ولا يُقاد إلى ما هو أبعد من الحقيقة بواسطة فرضية مفضلة.

"للحصول على الأفكار الفيزيائية دون اعتماد نظرية فيزيائية، يجب أن نتعرف على وجود التشابهات الفيزيائية. وأعني بالتشابه الفيزيائي تلك الشبه الجزئي بين قوانين علم ما وقوانين علم آخر، بحيث يوضح كل منهما الآخر. على سبيل المثال، جميع العلوم الرياضية تستند إلى العلاقات بين القوانين الفيزيائية وقوانين الأعداد، بحيث يهدف العلم

الدقيق إلى تقليص مشاكل الطبيعة إلى تحديد كميات عن طريق العمليات على عناصرها.

عند الانتقال من أكثر التشابهات شمولية إلى شبه جزئي، نجد نفس التشابه في الشكل الرياضي بين ظاهرتين مختلفتين، مما أدى إلى نظرية فيزيائية للضوء.

التغيرات في اتجاه الضوء عند انتقاله من وسط إلى آخر مماثلة لانحراف مسار جسيم يتحرك في مساحة ضيقة حيث تؤثر قوى مكثفة. هذا التشابه، الذي يمتد فقط إلى الاتجاه وليس إلى سرعة الحركة، كان يُعتقد طويلاً أنه التفسير الحقيقي لانكسار الضوء؛ وما زال مفيدًا في حل بعض المشاكل كطريقة اصطناعية. أما التشابه الآخر بين الضوء واهتزازات الوسط المرن، فهو أوسع نطاقًا، ولكن يجب أن نتذكر أنه يقوم فقط على التشابه في الشكل بين قوانين الضوء وقوانين الاهتزازات.
من خلال تجريد هذا التشابه من الشكل الفيزيائي وتحويله إلى نظرية "التناوب العرضي"، يمكن الحصول على نظام من الحقائق قائم على الملاحظة، لكنه قد يفتقر إلى وضوح التصورات وثراء الطريقة. ذكرت هذا عن قضايا البصريات كمقدمة لمناقشة النظرية المقبولة تقريبًا للتجاذب عن بعد.

"لقد اكتسبنا جميعًا المفهوم الرياضي لهذه التجاذبات، ويمكننا التفكير فيها وتحديد صيغها الرياضية المناسبة. هذه الصيغ لها دلالة رياضية واضحة، ونتائجها تتفق مع الظواهر الطبيعية. لا توجد صيغة في الرياضيات التطبيقية أكثر توافقًا مع الطبيعة من صيغة التجاذب، ولا

نظرية أفضل رسوخًا في العقول من نظرية تأثير الأجسام على بعضها عن بعد.

قوانين توصيل الحرارة في الوسط المتجانس تبدو للوهلة الأولى مختلفة في طبيعتها الفيزيائية عن قوانين التجاذب. الكميات الداخلة فيها هي الحرارة، تدفق الحرارة، والتوصيلية. كلمة "قوة" غريبة عن الموضوع. ومع ذلك، نجد أن القوانين الرياضية لحركة الحرارة المنتظمة في وسط متجانس متطابقة في الشكل مع قوانين التجاذب المتناسب عكسيًا مع مربع المسافة. يكفي أن نستبدل مصدر الحرارة بمركز التجاذب، وتدفق الحرارة بتأثير التجاذب، ودرجة الحرارة بالجهد، لتحويل حل مسألة التجاذب إلى حل مسألة الحرارة. أعتقد أن هذا التشابه بين صيغ الحرارة والتجاذب أشار إليه لأول مرة الأستاذ ويليام طومسون في مجلة كامبريدج الرياضية، المجلد الثالث.

"تُفترض عملية توصيل الحرارة بأنها تتم عن طريق التفاعل بين أجزاء متجاورة من الوسط، بينما قوة التجاذب هي علاقة بين الأجسام البعيدة. ومع ذلك، إذا لم نعرف سوى ما هو معبر عنه في الصيغ الرياضية، فلن يكون هناك فرق بين الظاهرتين.

صحيح أنه إذا أضفنا اعتبارات أخرى وراقبنا حقائق إضافية، سيأخذ الموضوعان مظاهر مختلفة جدًا، لكن التشابه الرياضي لبعض قوانينهم سيظل قائمًا، ويمكن الاستفادة منه لإثارة الأفكار الرياضية المناسبة.

"باستخدام هذا النوع من التشابه، حاولت عرض تلك الأفكار الرياضية الضرورية لدراسة ظواهر الكهرباء بطريقة واضحة ومناسبة للعقل. الأساليب مستوحاة من عمليات الاستدلال التي وجدت في أبحاث

فاراداي، والتي، رغم تفسيرها رياضيًا بواسطة البروفيسور طومسون وآخرين، يُعتقد عمومًا أنها غير محددة وغير رياضية مقارنة بأساليب الرياضيين المحترفين.

بالطريقة التي أعتمدها، آمل أن أوضح أنني لا أحاول تأسيس أي نظرية فيزيائية لعلم لم أجري فيه تجربة واحدة تقريبًا، وأن الغرض من تصميمي هو إظهار كيف يمكن، من خلال التطبيق الصارم لأفكار وأساليب فاراداي، وضع صلات الظواهر المختلفة التي اكتشفها أمام العقل الرياضي بوضوح. لذلك سأجنب إدخال أي شيء لا يخدم كمثال مباشر على أساليب فاراداي، أو الاستنتاجات الرياضية الممكنة منها. عند معالجة الأجزاء الأبسط من الموضوع، سأستخدم الأساليب الرياضية لفاراداي وكذلك أفكاره. وعندما يتطلب الموضوع التعقيد، سأستخدم الترميز التحليلي، مع الالتزام بتطوير الأفكار التي أنشأها نفس الفيلسوف.

"عليّ أولًا شرح وتوضيح فكرة "خطوط القوة". عندما يُشحن جسم بطريقة ما، سيختبر جسم صغير مشحون بشحنة موجبة قوة تدفعه في اتجاه معين. إذا أصبح هذا الجسم مشحونًا بالسالب، ستؤثر عليه قوة مساوية في الاتجاه المعاكس.

تنطبق نفس العلاقات على الجسم المغناطيسي وأقطاب مغناطيسية صغيرة؛ إذا تأثر القطب الشمالي في اتجاه ما، سيتأثر الجنوبي في الاتجاه المعاكس.

بهذه الطريقة يمكننا رسم خط يمر عبر أي نقطة في الفضاء يمثل اتجاه القوة المؤثرة على جسيم مشحون موجب، أو على قطب شمالي أولي،

والاتجاه المعاكس للجسيمات السالبة أو القطب الجنوبي. إذا بدأنا عند أي نقطة ورسمنا خطًا بحيث يتطابق اتجاهه في كل نقطة مع القوة الناتجة، فإن هذا المنحنى يوضح اتجاه القوة عند كل نقطة، ويمكن تسميته بخط القوة. يمكننا رسم خطوط قوة أخرى حتى نملأ الفضاء بالكامل.

نحصل بذلك على نموذج هندسي للظواهر الفيزيائية يوضح اتجاه القوة، لكننا نحتاج إلى وسيلة لتمثيل شدة القوة عند أي نقطة. إذا اعتبرنا هذه الخطوط أنابيب دقيقة ذات مقطع متغير تحمل سائلًا غير قابل للانضغاط، فبما أن سرعة السائل عكسية لمقطع الأنبوب، يمكننا تنظيم المقطع لتغيير السرعة وفق أي قانون محدد، وبالتالي تمثيل شدة القوة بحركة السائل في هذه الأنابيب. هذه الطريقة قابلة للتطبيق على أي نظام قوى يمكن تصوره، لكنها مبسطة جدًا في حالة القوى الكهربائية والمغناطيسية التي يمكن تفسيرها بنظرية التجاذب العكسي لمربع المسافة.

"عادة ما يبدأ التحقيق في قوانين هذه القوى بافتراض أن الظواهر ناتجة عن قوى تجاذب أو تنافر بين نقاط معينة. ومع ذلك، يمكننا الحصول على رؤية مختلفة للموضوع، أكثر ملاءمة لتحقيقاتنا المعقدة، باعتماد تعريف القوى بأنها تمثل في الحجم والاتجاه بحركة منتظمة لسائل غير قابل للانضغاط.

سأصف أولًا طريقة يمكن بها تصور حركة هذا السائل بوضوح، ثم أرسم عواقب افتراض شروط معينة للحركة، وأوضح تطبيق الطريقة على بعض الظواهر الكهربائية والمغناطيسية والجلفانية الأقل تعقيدًا، وأخيرًا أُظهر كيف يمكن من خلال توسيع هذه الطرق وإدخال فكرة

أخرى لفاراداي، تصور قوانين التجاذب والتأثيرات الحثية للمغناطيسات والتيارات بوضوح، دون افتراض أي طبيعة فيزيائية للكهرباء، أو إضافة أي شيء لم يُثبت بالتجربة.

من خلال الإحالة إلى الفكرة الهندسية البحتة لحركة سائل خيالي، آمل في الوصول إلى العمومية والدقة، وتجنب المخاطر الناتجة عن نظرية مبكرة تدعي تفسير سبب الظواهر. إذا كانت النتائج التي جمعتها من التأمل مفيدة للفلاسفة التجريبيين في ترتيب وتفسير نتائجهم، فقد خدمت هدفها، وستتشكل نظرية ناضجة تفسر فيها الحقائق الفيزيائية فيزيائيًا، من قبل من يستجوبون الطبيعة نفسها للحصول على الحل الحقيقي الوحيد للأسئلة التي تقترحها النظرية الرياضية".

كانت الفكرة جريئة للغاية: أن يشرح شاب في الثالثة والعشرين من عمره، من خلال حركة سائل غير قابل للانضغاط، بعض الظواهر الكهربائية والمغناطيسية الأقل تعقيدًا، ويبين كيف يمكن تصور قوانين التجاذب للمغناطيسات والتيارات دون أي افتراض عن طبيعة الكهرباء، أو إضافة ما لم يُثبت بالتجربة.

قد يكون من المفيد استعراض موقف النظرية الكهربائية في عام 1855 باختصار شديد:

أثبتت تجارب كولومب الحقائق الأساسية للتجاذب الكهربائي والتنافر، وصاغ كولومب نفسه نحو عام 1785 نظرية مبنية على هذه التجارب يمكن "الهجوم عليها فقط عن طريق إثبات عدم دقة نتائجه التجريبية". افترض كولومب وجود سائلين كهربائيين، وهي النظرية التي طوّرها فرانكلين مسبقًا، لكنه قال:

»أنبّه مسبقًا، حتى أضع النظرية التي ستأتي بمنأى عن أي جدال منهجي، إلى أنني في افتراض وجود سائلين كهربائيين لا أقصد شيئًا سوى عرض نتائج الحساب والتجربة بأقل عدد ممكن من العناصر، وليس الإشارة إلى الأسباب الحقيقية للكهرباء«.

عمل كافنديش في إنجلترا في نفس الوقت تقريبًا، لكنه نشر قليلًا، ولم يُعترف بقيمة أعماله إلا بعد صدور "الأبحاث الكهربائية لهينري كافنديش" عام 1879 بتحرير كليرك ماكسويل.

في أوائل هذا القرن، بدأ تطبيق التحليل الرياضي على المشاكل الكهربائية بواسطة لابلاس، الذي درس توزيع الكهرباء على المجسمات البيضاوية، وحوالي عام 1811 نُشر عمل بواسون العظيم عن توزيع الكهرباء على كرتين على أي مسافة. في تلك الأثناء، كانت خصائص التيار الكهربائي تُدرس؛ اكتشف جالفاني انقباض عضلي في ساق ضفدع نتيجة تلامس المعادن المختلفة عام 1790. اخترع فولتا الكومة الفولتية عام 1800، واكتشف أورستد عام 1820 أن التيار الكهربائي يولد قوة مغناطيسية في محيطه، وبنى أمبير على ذلك نظريته في الكهروديناميكا، موضحًا كيفية حساب القوى بين الدوائر الحاملة للتيارات اعتمادًا على قانون القوة بين عناصر الدوائر. أثبتت تجاربه أن النتائج المترتبة على هذا القانون متوافقة مع كل الحقائق المرصودة، لكنها لا تثبت أن قانون أمبير وحده يفسر كل الظواهر.

كتب ماكسويل في "الكهرباء والمغناطيسية"، المجلد الثاني، ص. 162:

"التحقيق التجريبي الذي أجرى أمبير لتأسيس قوانين التأثير الميكانيكي بين التيارات الكهربائية هو من أروع الإنجازات في العلم. تبدو النظرية والتجربة وكأنهما قد خرجتا كاملتين من عقل 'نيوتن الكهرباء'. إنها مثالية في الشكل ودقيقة للغاية، وتلخص في صيغة يمكن استنتاج كل الظواهر منها، والتي ستظل دائمًا الصيغة الأساسية للكهروديناميكا.

مع ذلك، فإن طريقة أمبير، رغم كونها استقرائية، لا تسمح لنا بتتبع تكوين الأفكار التي قادته. من الصعب أن نصدق أن أمبير اكتشف القانون فقط عبر التجارب الموصوفة. يبدو أنه اكتشف القانون بطريقة لم يوضحها، وعندما أنشأ بعد ذلك برهانًا كاملًا، أزال كل أثر للهيكل الذي بنى عليه".

أصبح الدليل التجريبي على نظرية أمبير، على الأقل فيما يتعلق بالدارات المغلقة، لا يُقوض بواسطة ويبر حوالي 1846، بينما نشر غراسمان ونيفمان في العام السابق قوانين للتجاذب بين عنصرين من التيار تختلف عن قانون أمبير، لكنها تؤدي إلى نفس النتائج للدارات المغلقة.

في ورقة نُشرت عام 1846، أعلن ويبر فرضيته التي تربط بين التأثير الكهروستاتيكي والكهروديناميكي، مفترضًا أن القوة بين جسيمين كهربائيين تعتمد على حركتهما وعلى المسافة بينهما. وقد اقترحت نظرية مماثلة من قبل غاوس بعد وفاته، لكنها أثبتت عدم اتساقها مع حفظ الطاقة. تتجنب نظرية ويبر هذا التعارض وتؤدي، للدارات المغلقة، إلى نفس نتائج أمبير. ومع ذلك، أثبت فون هيلمولت

أنه وفق ظروف معينة، يمكن لجسم أن يتصرف كما لو كانت كتلته سالبة، ويتحرك في اتجاه معاكس للقوة.

منذ 1846، اقتُرحت نظريات عديدة لتفسير قوانين أمبير. في الوقت نفسه، لاحظ فاراداي في 1821 أن سلكًا يحمل تيارًا يمكن أن يستمر في الدوران داخل مجال مغناطيسي بفعل التفاعل بين المغناطيس والتيار. لاحظ أراجو في 1824 حركة مغناطيس نتيجة دوران قرص نحاسي بجواره، وفي 1831 بدأ فاراداي أبحاثه التجريبية في الحث الكهرومغناطيسي. تقريبًا في نفس الفترة، أجرى جوزيف هنري في واشنطن تجارب مستقلة عن فاراداي حول الحث الكهرومغناطيسي، لكنها لم تُعطَ الاهتمام الكافي إلا في السنوات الحديثة نسبيًا.

أجرى لينز في 1833 أبحاثًا مهمة أدت إلى اكتشاف العلاقة بين اتجاه التيارات المستحثة وقوانين أمبير، ملخصة في قاعدته التي تقول إن اتجاه التيار المستحث يكون دائمًا بحيث يعارض الحركة التي تولده.

طور نيفمان عام 1845، انطلاقًا من هذا القانون، النظرية الرياضية للحث الكهرومغناطيسي، وفي نفس الوقت تقريبًا أوضح ويبر كيف يمكن استنتاجها من قانونه الأساسي للعمل الكهربائي.

ظهر اسم فون هيلمولت لأول مرة في هذا الموضوع عام 1851، وسنتناول كتاباته بمزيد من التفصيل لاحقًا.

وفي الوقت نفسه، وخلال نفس الفترة، قام عدة كتاب، منهم ميرفي، بلانا، تشارلز، شتورم، وغاوس، بتوسيع أعمال بواسون في مجال الاستاتيكا الكهربائية، معالجين المسائل التي ظهرت باعتبارها مشاكل

في توزيع سائل جذاب، يجذب أو يصد وفقًا لقانون نيوتن، على الرغم من أن أكبر التقدمات كانت من نصيب صانع أحذية متعلم ذاتيًا في نوتنغهام يُدعى جورج غرين، في مقاله “عن تطبيق التحليل الرياضي على نظريات الكهرباء والمغناطيسية”، عام 1828.

كتب لورد كيلفن عن أبحاث غرين قائلاً: "لقد أدت أبحاث غرين إلى الاستنتاجات الأولية التي يجب أن تشكل الأساس المشروع لأي بنية رياضية كاملة تُبنى من المواد التي توفرها القوانين التجريبية لكولومب".

ويُلاحظ أن غرين هو مبتكر مصطلح "الجهد .(Potential) "ومع ذلك، بقي مقاله مهملًا منذ عام 1828 حتى أشار إليه لورد كيلفن عام 1845. وفي هذه الأثناء، تم إعادة اكتشاف بعض أهم نتائجه من قبل غاوس وتشارلز وتومسون نفسه.

حتى حوالي عام 1845، كانت الأعمال التجريبية التي استندت إليها هذه الأبحاث الرياضية في الاستاتيكا الكهربائية هي أعمال كولومب. يُفترض أن الجسم المكهرب يمتلك شحنة من سائل غير مرئي يُسمى "الكهرباء". تتنافر جسيمات الكهرباء وفق قانون معين، ويتوزع السائل في حالة توازن على سطح أي موصل مشحون وفق هذا القانون. وفقًا لهذه النظرية، هناك نوعان متعاكسان من السائل الكهربائي، موجب وسالب، حيث تتنافر شحنتان من نفس النوع، وتجذب شحنتان من نوعين متعاكسين بعضهما البعض؛ وتكون قوة التجاذب أو التنافر متناسبة مع حاصل ضرب الشحنات وعكسية مع

مربع المسافة بينهما. ويحدث التفاعل بين شحنتين عبر الفضاء الذي يفصلهما، أي تفاعل عن بعد.

في عام 1837، نشر فاراداي في السلسلة الحادية عشرة من "أبحاثه التجريبية" ورقته الأولى عن "الاستحثاث الكهروستاتيكي". وأظهر—كما أثبت كافنديش منذ وقت طويل، رغم أن النتائج بقيت غير منشورة—أن القوة بين جسمين مشحونين تعتمد على الوسط العازل المحيط بهما، وليس فقط على شكلهما وموقعهما. ويعبر فاراداي عن الاستحثاث بأنه يحدث على طول خطوط منحنية، وهو فعل لجزيئات متجاورة؛ ويطلق على هذه الخطوط المنحنية اسم "خطوط القوة."

ويكتب لورد كيلفن في عام 1845 عن هذه الأبحاث: "لقد أجريت أبحاث السيد فاراداي بهدف اختبار فكرة كان يمتلكها منذ وقت طويل، مفادها أن قوى التجاذب والتنافر التي تمارسها الكهرباء الحرة ليست نتاج أفعال تحدث عن بعد، بل تُنقل بواسطة التفاعل الجزيئي بين الجزيئات المتجاورة للوسط العازل المحيط بالأجسام المكهربة، والذي يُسميه العازل الكهربائي. ومن خلال هذه الفكرة توصل إلى رؤى مذهلة عن الاستحثاث، أو، في الواقع، عن الفعل الكهربائي بشكل عام. ولأن من المستحيل أن تكون الظواهر التي رصدها فاراداي متناقضة مع نتائج التجربة التي تشكل نظرية كولومب، فمن المتوقع أن الاختلاف بين أفكاره وأفكار كولومب ينشأ فقط من اختلاف طريقة التعبير والتفسير الفيزيائي لنفس القوانين؛ وعلاوة على ذلك، يمكن إظهار أن أي طريقة لرؤية هذا الموضوع، إذا تم تطبيقها بما فيه الكفاية، يمكن أن تُشكل أساسًا لنظرية رياضية تؤدي إلى المبادئ الأولية للطريقة الأخرى كنتائج".

في الصفحات التالية، يستعرض لورد كيلفن نتائج التناظر بين توصيل الحرارة والفعل الكهروستاتيكي، والتي أشار إليها قبل ثلاث سنوات (1842) في ورقته عن "الحركة المنتظمة للحرارة في الأجسام الصلبة المتجانسة"، ويناقش ارتباطها بالنظرية الرياضية للكهرباء. تُظهر المشكلة الرياضية المتمثلة في توزيع مصادر الحرارة في موصل متجانس للحصول على درجة حرارة ثابتة محددة عند كل نقطة، أنها مطابقة رياضيًا لمشكلة توزيع الكهرباء في حالة التوازن، بحيث يكون عند كل نقطة جهد كهربائي مساوٍ لقيمة درجة الحرارة.

وبالتالي، يمكن جعل القوانين الأساسية لتوصيل الحرارة أساسًا للنظرية الرياضية للكهرباء، لكن الفكرة الفيزيائية التي توحي بها هي انتشار التأثير من خلال التفاعل المتبادل للجزيئات المتجاورة، بدلًا من فكرة الجسيمات المادية التي تجذب أو تتنافر عن بعد، كما يتبع بشكل طبيعي من بيان قانون كولومب.

ويواصل لورد كيلفن:

"جميع الرؤى التي طرحها فاراداي وأوضحها، كما أُثبت بالتجربة، تقود إلى هذه الطريقة لوضع النظرية الرياضية، ومن حيث التحليل، سيكون ذلك، في معظم الحالات العامة، أبسط إن أمكن من طريقة كولومب. وبالطبع، سيكون تحليل المسائل الخاصة متطابقًا في الطريقتين. هكذا يصل فاراداي إلى معرفة بعض أهم النظريات الرياضية التي، بطبيعتها، كان من المتوقع ألا تُدرك إلا كحقائق رياضية".

تحتوي أوراق لورد كيلفن عن "النظرية الرياضية للكهرباء" المنشورة من 1848 إلى 1850، و"المقترحات حول نظرية التجاذب" (1842)، و"نظرية الصور الكهربائية" (1847)، وورقته عن "النظرية الرياضية للمغناطيسية" (1849)، على أهم النتائج التي تم تحقيقها في العلوم الرياضية للاستاتيكا الكهربائية والمغناطيسية حتى وقت أول ورقة لماكسويل.

وفي المقدمة لكتاب "الكهرباء والمغناطيسية"، كتب ماكسويل: "قبل أن أبدأ دراسة الكهرباء، قررت ألا أقرأ أي رياضيات في الموضوع حتى أكون قد قرأت أولاً 'الأبحاث التجريبية في الكهرباء.' كنت أعلم أن هناك اختلافًا مزعومًا بين طريقة فاراداي في تصور الظواهر وطريقة الرياضيين، بحيث لم يكن هو ولا هم راضين عن لغة الآخر. كما كنت مقتنعًا بأن هذا الاختلاف لم ينشأ من خطأ أي طرف. وقد اقتنعت بذلك أول مرة من خلال السير ويليام تومسون، الذي أعود له بالكثير مما تعلمته عن الموضوع".

مع تقدمه في دراسة فاراداي، أدرك ماكسويل أن طريقة فاراداي في تصور الظواهر هي أيضًا طريقة رياضية، وإن لم تُعرض بالرموز الرياضية التقليدية، ووجد أن هذه الطرق يمكن التعبير عنها بصيغ رياضية عادية، ومقارنتها مع طرق الرياضيين المحترفين.

على سبيل المثال، كان فاراداي يرى في ذهنه خطوط القوة التي تمر عبر كل الفضاء، حيث يرى الرياضيون مراكز قوى تجذب عن بعد. رأى فاراداي وسطًا حيث لم يروا سوى المسافة. بحث فاراداي عن مركز الظواهر في الأفعال الواقعية التي تحدث في الوسط، بينما اقتنع

الرياضيون بأنهم وجدوا ذلك في قوة العمل عن بعد المفروضة على السوائل الكهربائية.

والآن، رأى ماكسويل تشابهًا بين الاستاتيكا الكهربائية والحركة المستقرة لسائل غير قابل للانضغاط مثل الماء، وهو هذا التشابه الذي طوره في الجزء الأول من ورقته. يتدفق الماء على طول خطوط محددة؛ وإذا تكوَّن سطح بالكامل من مثل هذه الخطوط، فلن يعبره الماء أبدًا. وفي أي تيار ماء، يمكننا تخيل عدد من هذه الأسطح مقسمة إلى سلسلة من الأنابيب؛ كل منها يكون أنبوب تدفق، ويبقى كل أنبوب مليئًا بالماء دائمًا. وهكذا، فإن كمية الماء التي تعبر مقطعًا عموديًا على طول الأنبوب في الثانية واحدة تكون دائمًا ثابتة. ومن شكل الأنبوب يمكننا استنتاج اتجاه وقوة التدفق، فكلما اتسع الأنبوب كان التدفق أقل نسبيًا، والعكس صحيح.

يمكننا أيضًا رسم عدد من الأسطح في السائل، يكون الضغط على كل منها متساويًا؛ هذه الأسطح تقطع أنابيب التدفق بزوايا قائمة. ولنفترض أن الفارق بين الضغط على أي سطحين متتاليين هو واحد، حينها ستكون الأسطح قريبة عند النقاط التي يتغير فيها الضغط بسرعة، وحيث يكون التغير بطيئًا ستكون المسافة بين سطحين متتاليين كبيرة.

إذا استطعنا، إذن، رسم أسطح الضغط وأنابيب التدفق في أي حالة حركة، يمكننا تحديد حركة السائل بالكامل. الآن، نفس التعبيرات الرياضية التي تظهر في النظرية الهيدروديناميكية تظهر أيضًا في نظرية الكهرباء، مع تغيير معنى الرموز فقط. فسرعة السائل تُستبدل

بالقوة الكهربائية، وفارق ضغط السائل يُستبدل بالعمل المبذول أو فرق الجهد أو الضغط الكهربائي.

تُعطي الأسطح والأنابيب، المرسومة كحل لأي مسألة هيدروديناميكية، أيضًا حلًا لمسألة كهربائية؛ أنابيب التدفق هي أنابيب فاراداي للقوة أو أنابيب الاستحثاث، والأسطح ذات الضغط الثابت هي أسطح الجهد الكهربائي المتساوي. يمكن أن يحدث الاستحثاث على خطوط منحنية كما يمكن أن تنحني أنابيب التدفق؛ والتشابه بين الاثنين كامل.

لكن، كما يوضح ماكسويل، يمتد التشابه أكثر. فقد تم التعرف على أن التيار الكهربائي المار في سلك له خصائص مشابهة للتيار السائل في أنبوب. عندما يمر تيار ثابت عبر أي موصل صلب، تتكوَّن في الموصل أنابيب تدفق كهربائي وأس surfaces of constant pressure.هذه الأنابيب والأسطح هي نفسها التي تتشكل بتدفق السائل عبر صلب حدود سطحه مماثلة لحدود الموصل، شريطة أن يكون تدفق السائل متناسبًا مع تدفق الكهرباء.

تشير هذه التشابهات إلى التيارات الثابتة، حيث لا يعتمد التدفق عند أي نقطة في الموصل على الزمن. في الجزء الثاني من ورقته، يتعامل ماكسويل مع الحالة الكهرو-تونية لفاراداي. وجد فاراداي أنه عندما تُحدث تغييرات في الظواهر المغناطيسية المحيطة بالموصل، ينشأ تيار كهربائي في الموصل، يستمر طالما كانت التغيرات المغناطيسية جارية، ويتوقف عندما يصبح الوضع المغناطيسي ثابتًا.

ويكتب ماكسويل:

"أدت اعتبارات من هذا النوع البروفيسور فاراداي إلى ربط اكتشافه لاستحثاث التيارات الكهربائية بمفهوم حالة تدخل فيها جميع الأجسام بوجود المغناطيسات والتيارات. هذه الحالة لا تظهر بأي ظواهر معروفة طالما أنها غير مضطربة، ولكن أي تغيير فيها يُشير إليه تيار أو ميل نحو تيار. وأطلق على هذه الحالة اسم 'الحالة الكهرو-تونية'، وعلى الرغم من أنه نجح لاحقًا في شرح الظواهر التي أوحت بها بوسائل أقل افتراضية، فقد ألمح في عدة مناسبات إلى احتمال اكتشاف ظواهر تجعل الحالة الكهرو-تونية موضوع استنتاج مشروع".

ويعرض ماكسويل كيفية الحصول على تعبير رياضي للحالة الكهرو-تونية لفاراداي. في كتابه "الكهرباء والمغناطيسية"، تُعرف هذه الحالة باسم "الجهد المتجه"، وتحتوي الورقة المعنية، على الرغم من عدم اكتمالها، على أول بيان له للمعادلات المتعلقة بالمجال الكهربائي المرتبطة ارتباطًا وثيقًا باسم ماكسويل.

وكان التقدم الكبير في النظرية الذي حققته الورقة هو الاعتراف الصريح بوظائف رياضية معينة تمثل الحالة الكهرو-تونية لفاراداي، واستخدامها في حل المشكلات الكهرومغناطيسية.

ولا تحتوي الورقة على نظرية فيزيائية جديدة للكهرباء، لكن ظهرت لاحقًا في كتابات ماكسويل التالية نظرة أكثر شمولًا للمجال الكهرومغناطيسي مقارنة بما كان في ورقه المبكرة عن "خطوط القوة الفيزيائية."

ويجب ألا يُفترض أن التصورات المادية البدائية عن التروس والبكرات، التي سنصفها لاحقًا، كانت أكثر من مجرد نموذج، مكّن

ماكسويل من تصور كيفية تمثيل التغيرات التي تحدث عندما يمر تيار كهربائي في سلك بحركة جسيمات مادية فعلية.

وكانت المسألة أمامه هي وضع نظرية فيزيائية للكهرباء، تشرح القوى المؤثرة على الأجسام المكهربة بواسطة التفاعل بين أجزاء متجاورة من الوسط في الفضاء المحيط بهذه الأجسام، بدلًا من العمل المباشر عبر المسافة الفاصلة بينها، وهو سؤال مشابه، لا يزال بلا إجابة، ظهر أيضًا في حالة الجاذبية. فقد حدد الفلكيون القوى بين الأجسام الجاذبة، لكنهم لا يعرفون كيف تنشأ تلك القوى.

وقد أُشير بالفعل إلى ميل ماكسويل لاستخدام النماذج؛ فقد أدى به ذلك إلى بناء دوامة لتوضيح ديناميكيات الجسم الصلب الدوار حول نقطة ثابتة، ونموذج حلقات زحل (الذي أصبح الآن في مختبر كافنديش) لتوضيح حركة الأقمار في الحلقات. كما شرح العديد من قوانين الغازات من خلال تأثير الجزيئات، والآن كان عليه ابتكار نموذج ميكانيكي لحالة المجال الكهرومغناطيسي بالقرب من نظام من الموصلات الحاملة للتيارات.

وكان فاراداي، كما رأينا، ينظر إلى الاستحثاث الكهربائي والمغناطيسي على أنه يحدث على طول خطوط القوة المنحنية. يصور هذه الخطوط كأحبال من الجزيئات تنطلق من موصل مشحون أو مغناطيس، وتؤثر على الأجسام القريبة. تميل هذه الأحبال إلى التقصير، وفي الوقت نفسه تنتفخ جانبياً. وبالتالي، يميل الموصل المشحون إلى جذب الأجسام الأخرى نحوه، ويحدث توتر على طول

خطوط القوة، بينما يدفع كل أنبوب من الجزيئات جيرانه جانبًا؛ ويترافق ضغط عمودي على خطوط القوة مع هذا التوتر.

وباستخدام هذا الافتراض للضغط والتوتر، يتساءل ماكسويل إن كان يمكن ابتكار آلية لشرح ذلك؟ وقد شبّه ماكسويل خطوط القوة بألياف العضلة؛ فعند انقباض الألياف، تتحرك الطرف المتصل بها، وتنتفخ العضلة جانبياً.

ومن منظور آخر، يمكن اعتبار خط القوة سلسلة من الخلايا الصغيرة المصنوعة من مادة مرنة، كل منها مليء بسائل. وإذا افترضنا أن هذه السلسلة تدور بسرعة حول اتجاه خط القوة، فإن الخلايا تتمدد جانبياً وتقبض طوليًا؛ ويحدث توتر على طول خطوط القوة وضغط عمودي عليها. وكان هذا الأخير هو الفكرة التي استخدمها ماكسويل لاحقًا.

ويكتب ماكسويل في "خطوط القوة الفيزيائية:" "أقترح الآن فحص الظواهر المغناطيسية من منظور ميكانيكي، وتحديد التوترات أو الحركات في وسط يمكنها إنتاج الظواهر الميكانيكية المرصودة. إذا استطعنا بنفس الفرض ربط ظواهر التجاذب المغناطيسي بالظواهر الكهرومغناطيسية، ومع التيارات المستحثة، فسوف نكون قد وجدنا نظرية، وإن لم تكن صحيحة، لا يمكن إثبات خطئها إلا بالتجربة، مما سيعزز معرفتنا بهذا الجزء من الفيزياء".

وكان لورد كيلفن قد قدم في 1847 تمثيلًا ميكانيكيًا للقوى الكهربائية والمغناطيسية والجلفانية عن طريق إزاحات جسم صلب مرن في حالة شد، وكان الإزاحة الزاوية عند كل نقطة تتناسب مع القوة المغناطيسية، ومن ذلك تم تطوير العلاقة بين مختلف الكميات

الكهربائية وحركة الصلب. لكن لورد كيلفن لم يحاول تفسير أصل القوى المرصودة بواسطة تأثير هذه الشدود، بل استخدم فقط التناظر الرياضي لمساعدة الخيال في دراسة كلا المجالين.

واعتبر ماكسويل أن الفعل المغناطيسي موجود في شكل ضغط أو توتر، أو بشكل عام كإجهاد في وسط ما. ويفترض وجود وسط قادر على ممارسة القوة على الأجسام المادية وتحمل إجهاد كبير، سواء كان ضغطًا أو توترًا؛ هذا الوسط يجب أن يكون قادرًا على الحركة، وتنشأ القوى الكهرومغناطيسية من حركته وإجهاداته.

والافتراض الأساسي لماكسويل هو أنه في مجال مغناطيسي، هناك دوران مستمر للجزيئات حول خطوط القوة المغناطيسية كمحاور. فلننظر الآن إلى حالة المجال المغناطيسي الموحد، الذي يكون اتجاهه عموديًا على الورقة؛ لننظر إلى خطوط القوة كسلاسل متوازية من الجزيئات، تكون محاور هذه السلاسل عمودية على الورقة. يُفترض أن كل سلسلة تدور في نفس الاتجاه حول محورها، وتكون السرعة الزاوية للدوران مقياسًا للقوة المغناطيسية.

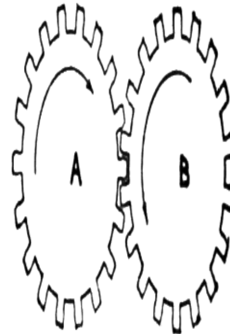
ونتيجة لهذا الدوران، سيكون هناك فروق في الضغط في اتجاهات مختلفة في الوسط؛ سيكون الضغط على طول محاور السلاسل أقل مما لو كان الوسط ساكنًا، والضغط في الاتجاهات العمودية على المحاور سيكون أكبر، وسيتصرف الوسط كما لو كان تحت توتر على طول محاور الجزيئات وتحت ضغط عمودي عليها. علاوة على ذلك، يمكن إثبات أن الضغط والتوتر يتناسبان مع مربع السرعة الزاوية—أي مربع القوة المغناطيسية—وهذه النتيجة تتفق مع نتائج التجربة.

وتظهر الحسابات الأكثر تفصيلًا أن هذا البيان صحيح عمومًا. إذا رسمنا خطوط القوة في أي مجال مغناطيسي، ثم افترضنا أن جزيئات الوسط تدور حول هذه الخطوط كمحاور، مع سرعات تتناسب عند كل نقطة مع القوة المغناطيسية، فإن توزيع الضغط يكون مطابقًا لما نعرفه فعليًا في المجال المغناطيسي.

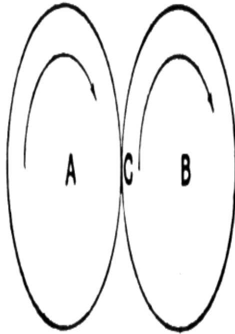
وبناءً على هذا الافتراض، يمتلك المغناطيس الدائم القدرة على تحريك الوسط المحيط به إلى دوران جزيئي مستمر حول خطوط القوة كمحاور. يمكن اعتبار الجزيئات التي يتم تدويرها كخلايا كروية أو شبه كروية مملوءة بسائل، أو مادة صلبة مرنة، ومحاطة بغشاء يحافظ على محتوياتها.

حتى هذه المرحلة، لا يوضح النموذج أيًا من الأفعال الكهربائية التي تحدث في المجال المغناطيسي. الطاقة كلها دورانية، والقوى كلها مغناطيسية.

لكن إذا نظرنا إلى أي سلسلتين متجاورتين من الجزيئات، فإنهما، عند تقطيعهما للورقة كما هو موضح في دائرتين في الشكل 1، ...



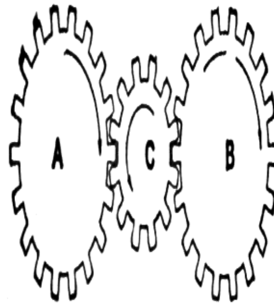
الشكل 1.



الشكل 2.

حينها، تدور هذه الخلايا في نفس الاتجاه، وبالتالي عند النقطةC ، حيث تتلامس، ستتحرك نقاط التلامس في اتجاهين متعاكسين، كما هو موضح برؤوس الأسهم، ويصعب تصور كيفية استمرار مثل هذه الحركة؛ إذ يتطلب ذلك أن تكون أسطح الخلايا ناعمة تمامًا، وإذا كان الأمر كذلك، فإنها ستفقد القدرة على نقل التأثير من خلية إلى أخرى.

يمكن مقارنة الخليتين A و Bبعجلتين مسننتين موضوعتين بالقرب من بعضهما البعض، ونرغب في تدويرهما في نفس الاتجاه. إذا كان بالإمكان تداخل الأسنان، كما في الشكل 2، فإن هذا مستحيل: يجب أن تتحرك العجلات المتتالية في القطار في اتجاهين متعاكسين.



الشكل 3.

في كثير من الآلات، يتم تحقيق النتيجة المطلوبة عن طريق إدخال عجلة خاملة ثالثة C بين العجلتين A وB، كما هو موضح في الشكل 3. يمكن أن تكون هذه العجلة صغيرة جدًا، ووظيفتها الوحيدة هي نقل حركة A إلى B بحيث يمكن لكل من A و Bالدوران في نفس الاتجاه. لا

يُشترط وجود أسنان على العجلات؛ فإذا كانت الأسطح خشنة تمامًا بحيث لا يحدث انزلاق، يمكن تحقيق نفس النتيجة دون الأسنان.

واسترشادًا بهذا التشبيه، قام ماكسويل بتوسيع نموذجه بافتراض أن كل خلية مغطاة بعدد من الجسيمات الصغيرة التي تتدحرج على سطحها. تلعب هذه الجسيمات دور العجلات الخاملة في الآلة، ومن خلال تدحرجها تمكّن فقط الأجزاء المجاورة لخلتين من التحرك في اتجاهين متعاكسين.

تخيل الآن عددًا من هذه الخلايا وعجلاتها الخاملة موضوعة في مستوى، وهو مستوى الورقة، ولنفترض أن كل خلية تدور بنفس السرعة الزاوية المنتظمة حول محور عمودي على هذا المستوى، فإن كل عجلة خاملة ستتعرض لقوتين متساويتين ومتعاكستين عند أطراف القطر الذي تتلامس فيه مع الخلايا المجاورة؛ وبالتالي ستبدأ بالدوران، لكن لن تكون هناك قوة تدفعها إلى الأمام؛ فلا يهم ما إذا كان المحور الذي تدور حوله حرًا أو ثابتًا، ففي كلتا الحالتين تدور العجلة الخاملة فقط.

لكن افترض الآن أن الخلايا المجاورة لا تدور بنفس المعدل. بالإضافة إلى دورانها، ستُدفع العجلة الخاملة للأمام بسرعة تعتمد على فرق الدوران، وإذا كانت قادرة على التحرك بحرية، فإنها ستتحرك من بين الخليتين. تخيل الآن أن الفجوات بين الخلايا مزودة بسلسلة من العجلات الخاملة. طالما تتحرك الخلايا المجاورة بسرعات مختلفة، سيكون هناك تيار مستمر من الجسيمات المتدحرجة أو العجلات الخاملة بينها. في الورقة، اعتبر ماكسويل هذه الجسيمات جسيمات

كهرباء، وحركتها تشكّل تيارًا كهربائيًا. في حقل مغناطيسي منتظم، لا يوجد تيار كهربائي؛ إذا تغيّرت شدة الحقل، تُحرك العجلات الخاملة وقد ينشأ تيار.

هذه الجسيمات صغيرة جدًا مقارنة بالدوامات المغناطيسية. وكتلة جميع الجسيمات لا تُذكر مقارنة بكتلة الدوامات، وتحتوي الجسيمات المحيطة بكل دوامة على العديد من الدوامات في جزيء واحد من الوسط؛ تتدحرج الجسيمات على الدوامات دون لمس بعضها البعض، وبالتالي طالما بقيت داخل نفس الجزيء، لا يحدث فقدان للطاقة بسبب المقاومة. أما عند حدوث تيار أو انتقال عام للجسيمات في اتجاه واحد، فعليها المرور من جزيء إلى آخر، وقد تواجه مقاومة وتولّد حرارة.

ويشير ماكسويل إلى أن مفهوم جسيم مرتبط حركته بالدوامة عبر تماس تدحرجي مثالي قد يبدو غير عملي. ويكتب: "لا أقدمه بوصفه طريقة اتصال موجودة في الطبيعة، أو حتى كفرضية كهربائية أوافق عليها طواعية. لكنه طريقة ميكانيكية ممكنة التحقيق وسهلة الدراسة، وتساعد في توضيح الروابط الميكانيكية الفعلية بين الظواهر الكهرومغناطيسية المعروفة، وبالتالي أقول إن من يفهم الطابع المؤقت والاحتياطي لهذه الفرضية سيجدها مفيدة أكثر من أن تعيقه في البحث عن التفسير الحقيقي للظواهر".

الجزء الأول من الورقة يتناول نظرية المغناطيسية؛ وفي الجزء الثاني تُطبّق الفرضية على ظواهر التيارات الكهربائية، ويُوضّح كيف يمكن استنتاج القوانين المعروفة للتيارات المستقرة والتحريض

الكهرومغناطيسي منها. وفي الجزء الثالث، المنشور في يناير وفبراير 1862، تُطبق نظرية الدوامات الجزيئية على الكهرباء الساكنة.

يُفترض أن الفرق بين الموصل والعازل أو الوسط العازل هو أن جسيمات الكهرباء في الموصل يمكنها الانتقال بحرية نسبية من جزيء إلى آخر، بينما في العازل يكون هذا النقل مستحيلًا، إذ يمكن للجسيمات التحرك فقط داخل الجزيء الذي ترتبط به؛ وتُفترض خلايا أو دوامات الوسط مرنة، وتقاوم بالمرونة تحرك الجسيمات داخلها. عند تأثير القوة الكهربائية على الوسط، يحدث تحرك الجسيمات داخل كل جزيء حتى تتوازن القوى الناتجة عن المرونة مع القوة الكهربائية؛ يتصرف الوسط كجسم مرن يتجاوب مع الضغط حتى يتوازن مع الإجهاد المرن. وعند إزالة القوة الكهربائية، تعود الخلايا أو الدوامات إلى شكلها الأصلي، وتعود الكهرباء إلى موضعها السابق.

في مثل هذا الوسط، يمكن إنشاء موجات ذات إزاحة دورية تنتقل بسرعة تعتمد على خصائصه الكهربائية. ويمكن الحصول على قيمة هذه السرعة من الملاحظات الكهربائية، وقد أظهر ماكسويل أن هذه السرعة، ضمن حدود الخطأ التجريبي، تتوافق مع سرعة الضوء. علاوة على ذلك، تحدث الاهتزازات الكهربائية، مثل ضوء، في مقدمة الموجة. ومن هنا يستنتج أن "مرونة الوسط المغناطيسي في الهواء هي نفسها لوسط انتشار الضوء، إذا لم يكن هذان الوسطان المتزامنان والمتسعان والمتساويان في المرونة مجرد وسط واحد".

وهكذا تحتوي الورقة على البذور الأولى للنظرية الكهرومغناطيسية للضوء. كما يُظهر أن الجذب بين جسمين صغيرين مشحونين يعتمد

على الوسط المحيط بهما، بينما تُحسب السعة التحريضية النوعية بما يتناسب مع مربع معامل الانكسار.

الجزء الرابع والأخير من الورقة يبحث في انتشار الضوء في حقل مغناطيسي. لقد أظهر فاراداي أن اتجاه الاهتزاز في موجة الضوء المستقطب، الذي يسافر موازيًا لخطوط القوة في الحقل المغناطيسي، يدور عند مروره عبر الحقل. وقد درس فيرديه القوانين العددية لهذه العلاقة، وأوضح ماكسويل كيف أن فرضيته حول الدوامات الجزيئية تؤدي إلى قوانين تتفق أساسًا مع ما وجده فيرديه.

ويشير إلى أن العلاقة بين المغناطيسية والكهرباء لها نفس الشكل الرياضي مثل العلاقة بين أزواج أخرى من الظواهر، أحدها خطي والآخر دوّار؛ علاوة على ذلك، يمكن بناء تشبيه بافتراض الطابع الخطي للمغناطيسية والدوار للكهرباء، أو العكس. ويشير إلى نظرية البروفيسور تشاليس، التي ترى أن المغناطيسية تتكون من تيارات في سائل تتوافق اتجاهاتها مع خطوط القوة المغناطيسية، في حين يُفترض أن التيارات الكهربائية ترافق، إن لم تكن تعتمد على، حركة دورانية للسائل حول محور التيار؛ وكذلك نظرية فون هلمولتز ذات الطابع المشابه إلى حد ما. ثم يوضح أسبابه الخاصة—التي تتفق مع آرء سير ويليام طومسون (اللورد كيلفن)—للافتراض بأن هناك دورانًا حقيقيًا في الحقل المغناطيسي لتفسير دوران مستوى الاستقطاب، وبقبول هذه الأسباب، يطور نتائج نظريته كما ذُكر أعلاه.

الحكم النهائي لماكسويل على النظرية موجود في كتابه "الكهرباء والمغناطيسية" (المجلد الثاني، §831، الطبعة الأولى، ص416)—:

»نظرية الدوامات الجزيئية، التي عملت على تطويرها بتفصيل كبير، نُشرت في المجلة الفلسفية للأعداد الخاصة بشهر مارس وأبريل ومايو 1861، ويناير وفبراير 1862.

"أعتقد أننا لدينا دليل جيد للرأي القائل بأن هناك نوعًا من الدوران يحدث في الحقل المغناطيسي، وأن هذا الدوران يتم بواسطة عدد كبير من أجزاء المادة الصغيرة جدًا، كل جزء يدور حول محوره الخاص، ويكون هذا المحور موازياً لاتجاه القوة المغناطيسية، وأن دوران هذه الدوامات المختلفة مرتبط ببعضه بواسطة نوع من الآلية التي تربط بينها.

"المحاولة التي قمت بها آنذاك لتخيل نموذج عملي لهذه الآلية يجب أن تُؤخذ على قدر ما هي عليه فقط، وهو توضيح أن آلية يمكن تخيلها قادرة على إنتاج ارتباط مكانيكي يعادل فعليًا الاتصال الفعلي لأجزاء الحقل الكهرومغناطيسي. مشكلة تحديد الآلية المطلوبة لإنشاء نوع معين من الاتصال بين حركات أجزاء نظام ما تقبل دائمًا عددًا لا نهائيًا من الحلول. من هذه الحلول، قد يكون بعضها أكثر تعقيدًا أو أكثر إرباكًا من غيره، لكن جميعها يجب أن تفي بشروط الميكانيكا بشكل عام.

"لكن النتائج التالية للنظرية لها قيمة أعلى :

(1)القوة المغناطيسية هي تأثير القوة الطردية للدوامات.

(2)التحريض الكهرومغناطيسي للتيارات هو تأثير القوى التي تُستدعى عند تغير سرعة الدوامات.

(3)القوة الدافعة الكهربائية تنشأ من الإجهاد في الآلية الموصلة.
(4)الإزاحة الكهربائية تنشأ من الاستجابة المرنة للآلية الموصلة”.

عند دراسة هذا الجزء من عمل ماكسويل، يجب أن نتذكر بوضوح أنه لم ينظر إلى الأثير كسلسلة من العجلات المسننة مع عجلات خاملة بينهما، أو أي شيء من هذا القبيل. لقد وضع نموذجًا ميكانيكيًا لمثل هذه العجلات المسننة والعجلات الخاملة، خصائصه تشبه في بعض الجوانب خصائص الأثير؛ ومن هذا النموذج استنتج، من بين أمور أخرى، الحقيقة المهمة أن الموجات الكهربائية ستنتقل إلى الخارج بسرعة الضوء. ومنذ ذلك الوقت، تم ابتكار نماذج أخرى لتوضيح نفس القوانين. في الواقع، قام البروفيسور فيتزجيرالد ببناء نموذج من العجلات المربوطة معًا بأشرطة مرنة، يوضح بجلاء نوع العمليات التي افترضها ماكسويل لتحدث في عازل تحت تأثير القوة الكهربائية. أما البروفيسور لودج، في كتابه "الآراء الحديثة حول الكهرباء"، فقد طور ترتيبًا مختلفًا للعجلات المسننة لتحقيق نفس النتيجة.

تنبؤات ماكسويل بشأن انتشار الموجات الكهربائية قد تم التحقق منها مؤخرًا في التجارب الباهرة لهرتز وأتباعه؛ وبقي علينا قبل مناقشة هذه التجارب أن نتتبع تطور هذه النظرية في يده.

الورقات التي ناقشناها ربما كانت مادية جدًا لتنال الانتباه الكامل الذي تستحقه؛ الأثير ليس سلسلة من العجلات، والكهرباء ليست عجلات خاملة مادية. في ورقته حول "النظرية الديناميكية للحقل الكهرومغناطيسي"، المجلة الفلسفية للمعاملات، 1864، تناول ماكسويل نفس الأسئلة بطريقة أكثر عمومية. وفي مناسبة سابقة قال:

"لقد حاولت وصف نوع معين من الحركة ونوع معين من الإجهاد بحيث يفسر الظواهر. في الورقة الحالية أتجنب أي فرضية من هذا النوع؛ وعند استخدام كلمات مثل الزخم الكهربائي والمرونة الكهربائية بالإشارة إلى الظواهر المعروفة لتحريض التيارات واستقطاب العوازل، أرغب فقط في توجيه ذهن القارئ نحو الظواهر الميكانيكية التي تساعده على فهم الظواهر الكهربائية. كل هذه التعابير في الورقة الحالية يجب اعتبارها توضيحية وليس تفسيرية." ثم يستمر—:

"وعند الحديث عن طاقة الحقل، أريد أن يُفهم حرفيًا. كل الطاقة هي نفسها كطاقة ميكانيكية، سواء كانت على شكل حركة أو مرونة أو أي شكل آخر.

الطاقة في الظواهر الكهرومغناطيسية هي طاقة ميكانيكية. السؤال الوحيد هو، أين توجد هذه الطاقة؟

وفقًا للنظريات القديمة، توجد الطاقة في الأجسام المكهربة، والدوائر الموصلة، والمغناطيسات، على شكل كمية غير معروفة تُسمى الطاقة الكامنة، أو القدرة على إنتاج تأثيرات معينة عن بُعد. وفقًا لنظريتنا، توجد الطاقة في الحقل الكهرومغناطيسي، في الفضاء المحيط بالأجسام المكهربة والمغناطيسية، وكذلك في تلك الأجسام نفسها، وتوجد في شكلين مختلفين يمكن وصفهما دون فرضية: الاستقطاب المغناطيسي والاستقطاب الكهربائي، أو وفقًا لفرضية محتملة جدًا، على أنهما حركة وإجهاد لنفس الوسط.

الاستنتاجات التي تم التوصل إليها في الورقة الحالية مستقلة عن هذه الفرضية، إذ استُنتجت من الحقائق التجريبية من ثلاثة أنواع—:

(1)تحريض التيارات الكهربائية بزيادة أو نقصان التيارات المجاورة وفق التغيرات في خطوط القوة التي تمر عبر الدائرة.
(2)توزيع شدة المجال المغناطيسي وفق تغيرات الجهد المغناطيسي.
(3)التحريض (أو التأثير) للكهرباء الساكنة عبر العوازل.
يمكننا الآن إثبات من هذه المبادئ وجود وقوانين القوى الميكانيكية التي تعمل على التيارات الكهربائية والمغناطيسات والأجسام المكهربة الموضوعة في الحقل الكهرومغناطيسي".

في مقدمة الورقة، يناقش بشكل عام التفسيرات المختلفة للظواهر الكهربائية التي قدمت، ويشير إلى أن—
"يبدو، إذن، أن بعض الظواهر في الكهرباء والمغناطيسية تؤدي إلى نفس الاستنتاج كما في البصريات، أي وجود وسط أثيري يملأ جميع الأجسام، ويتغير فقط بدرجة حسب وجودها؛ وأن أجزاء هذا الوسط قادرة على التحرك بفعل التيارات الكهربائية والمغناطيسات؛ وأن هذه الحركة تنتقل من جزء إلى آخر من الوسط بواسطة القوى الناتجة عن ارتباط تلك الأجزاء؛ وأن تحت تأثير هذه القوى هناك استجابة تعتمد على مرونة هذه الاتصالات؛ وبالتالي، يمكن أن توجد طاقة في شكلين مختلفين في الوسط: أحدهما طاقة الحركة الفعلية لأجزائه، والآخر الطاقة الكامنة المخزنة في الاتصالات بفضل مرونتها.
وهكذا، نحن نقود إلى تصور آلية معقدة قادرة على تنوع كبير في الحركة، لكنها متصلة بطريقة تجعل حركة جزء واحد تعتمد، وفق علاقات محددة، على حركة الأجزاء الأخرى، وتنتقل هذه الحركات بواسطة القوى الناشئة عن الإزاحة النسبية للأجزاء المرتبطة، بفضل مرونتها. يجب أن تخضع هذه الآلية للقوانين العامة للديناميكيات،

ويجب أن نكون قادرين على اشتقاق كل عواقب حركتها، بشرط معرفة شكل العلاقة بين حركات الأجزاء".

تم تطوير هذه القوانين العامة للديناميكيات، القابلة للتطبيق على حركة أي نظام مترابط، بواسطة لاغرانج، ويتم التعبير عنها في معادلاته المعممة للحركة. ومن أبرز إنجازات ماكسويل أنه رأى في الحقل الكهربائي نظامًا مترابطًا يمكن تطبيق معادلات لاغرانج عليه، وأنه تمكن من استنتاج الأفعال الميكانيكية والكهربائية التي تحدث بواسطة المبادئ الأساسية للديناميكيات.

طرق الورقة قُدمت لاحقًا بشكل أوسع في كتابه "معالجة الكهرباء والمغناطيسية" المنشور عام 1873؛ وسنصف عمله هنا بالشكل الذي اتخذه في النهاية.

المهمة التي وضعها ماكسويل أمامه كانت مزدوجة؛ أولًا كان عليه التعبير بالرموز، بأكثر شكل عام ممكن، عن القوانين الأساسية للكهرومغناطيسية كما استخلصت من التجارب، خاصة تجارب فاراداي، والعلاقات بين الكميات المختلفة المشاركة؛ وعندما تم ذلك، كان عليه أن يُظهر كيف يمكن استنتاج هذه القوانين من القوانين الديناميكية العامة القابلة للتطبيق على أي نظام من الأجسام المتحركة.

هناك فئتان من الظواهر، كهربائية ومغناطيسية، معروفة منذ زمن بعيد ومرتبطة معًا. عندما يُفرك قطعة من الشمع، يُلاحظ أنها تجذب أجسامًا أخرى، ويقال إنها تمارس قوة كهربائية في الفضاء المحيط بها؛ عندما يُغمس معدنان مختلفان في ماء قليل الحموضة ويتم توصيلهما بسلك، تحدث تغييرات في الصفائح والماء والسلك والفضاء

حول السلك، ويقال إن قوة كهربائية تمارس ويجري تيار كهربائي في السلك. كذلك، بعض الأجسام مثل حجر المغناطيس أو قطع الحديد والفولاذ المعالجة بطريقة معينة تُظهر ظواهر التأثير عن بُعد، ويقال إنها تمارس قوة مغناطيسية، ويُلاحظ أن هذه القوة موجودة بالقرب من تيار كهربائي ومرتبطة به.

أيضًا، عند تأثير القوة الكهربائية على جسم، قد تكون التأثيرات جزئيًا كهربائية وجزئيًا ميكانيكية؛ الحالة الكهربائية للجسم تتغير بشكل عام، بينما تنشأ أيضًا قوى ميكانيكية تميل لتحريك الجسم. يجب أن تعلمنا التجربة كيف تعتمد الحالة الكهربائية على القوة الكهربائية، وما العلاقة بين هذه القوة والقوى المغناطيسية التي قد تُلاحظ تحت ظروف معينة. عند تحديد الحالة الكهربائية والمغناطيسية للنظام، سيتعين إدخال كميات أخرى بالإضافة إلى القوة الكهربائية؛ والخطوة الأولى هي صياغة الكميات اللازمة وتحديد العلاقات بينها وبين القوة الكهربائية.

لنعتبر الآن سلكًا يربط بين قطبي بطارية كهربائية—في أبسط أشكالها، قطعة زنك وقطعة نحاس في وعاء من الحمض المخفف—تنتج القوة الكهربائية في كل نقطة من السلك. لنفترض أن هذه القوة معروفة؛ يجري تيار كهربائي حسب مادة وحجم السلك، وقيمته يمكن تحديدها في كل نقطة من السلك وفقًا للقوة الكهربائية حسب قانون أوم. إذا اعتبرنا هذا التيار أو القوة الكهربائية معروفًا، يمكننا تحديد الحالة الكهربائية والمغناطيسية في أي مكان آخر وفقًا للقوانين المعروفة. إذا افترضنا أن السلك مستقيم وطويل جدًا، طالما كان التيار ثابتًا وتجاهلنا التأثير الصغير للشحنة الكهربائية على السلك، فلن توجد قوة كهربائية خارج السلك. ومع ذلك، توجد قوة مغناطيسية، ويُلاحظ أن خطوط

القوة المغناطيسية هي دوائر حول السلك. كما يُلاحظ أن الشغل المبذول عند الدوران مرة كاملة حول السلك عكس القوة المغناطيسية يُقاس بالتيار الجاري عبر السلك، ويُحسب في النظام المعتاد للوحدات بضرب التيار في 4 .πهذا الأخير يعطينا واحدة من العلاقات اللازمة، بين القوة المغناطيسية الناشئة عن تيار وقوة التيار.

أيضًا، اعتبر تيارًا ثابتًا في موصل بأي شكل؛ يمكن قياس التدفق الكلي للتيار عبر أي مقطع من الموصل بعدة طرق، ويُلاحظ أنه في أي وقت يكون هذا التدفق الكلي نفسه لكل مقطع من الموصل. في هذا الصدد، يشبه تدفق التيار تدفق سائل غير قابل للانضغاط عبر أنبوب؛ حيث يكون الأنبوب ضيقًا تكون سرعة التدفق أكبر مما هي عليه في الأنابيب العريضة، لكن الكمية الكلية العابرة لكل مقطع في أي لحظة معينة هي نفسها.

الآن، لنعتبر جسمين موصلين، كرتين أو صفيحتين مسطحتين قريبتين من بعضهما ومعزولتين. لنتصل بكل موصل بأحد قطبي البطارية عبر سلك موصل. عند اتصالهما لفترة قصيرة، يُلاحظ وجود تيار في كل سلك يموت بسرعة إلى الصفر. في جوار الكرتين توجد قوة كهربائية؛ يُقال إن الكرتين مكهربتان، وخطوط القوة منحنية تمتد من كرة إلى أخرى. يُلاحظ أن الكرتين تجذبان بعضهما قليلًا، وأن الفضاء بينهما في حالة مختلفة عما كان عليه قبل شحن الكرتين. وفقًا لماكسويل، تم إنتاج الإزاحة الكهربائية في هذا الفضاء، والإزاحة الكهربائية في كل نقطة تتناسب مع القوة الكهربائية عند تلك النقطة.

وهكذا، (i)عندما تؤثر القوة الكهربائية على موصل، تنتج تيارًا يتناسب حسب قانون أوم مع القوة؛ (ii) عندما تؤثر على عازل، تنتج إزاحة كهربائية، وتتناسب الإزاحة مع القوة؛ و (iii)توجد قوة مغناطيسية في جوار التيار، ويُقاس الشغل المبذول في حمل قطب مغناطيسي حول أي دائرة كاملة مرتبطة بالتيار بما يتناسب مع التيار. المبدآن الأولان يعطينا مجموعتين من المعادلات التي تربط القوة الكهربائية بالتيار في موصل أو بالإزاحة في عازل؛ والثالث يربط القوة المغناطيسية بالتيار.

لنعد الآن إلى الفترة المتغيرة عندما يجري التيار في الأسلاك؛ ولتوضيح الأفكار، لنفترض أن الموصلين هما صفيحتان مسطحتان متساويتان، موضوعتان وجهاً لوجه وعلى مسافة صغيرة من بعضهما. في هذه الحالة، عند شحن الصفائح ووقف التيار، تكون الإزاحة الكهربائية والقوة تقريبًا محصورة بين الصفائح. أثناء الفترة المتغيرة، يكون التدفق الكلي عند أي لحظة عبر كل مقطع من السلك هو نفسه، ولكن، بالمعنى العادي للكلمة، لا يوجد تدفق للكهرباء عبر الوسط العازل بين الصفائح. ومع ذلك، فإن الإزاحة الكهربائية في هذا الفضاء تتغير باستمرار، من صفر في البداية إلى القيمة النهائية الثابتة عند توقف التيار. جزء أساسي من نظرية ماكسويل هو أن هذا التغير في الإزاحة الكهربائية يعادل من جميع النواحي تيارًا كهربائيًا. التيار عند أي نقطة في العازل يُقاس بمعدل تغير الإزاحة عند تلك النقطة.

علاوة على ذلك، من الضروري أيضًا أنه إذا اعتبرنا أي مقطع من العازل بين الصفائح، فإن معدل التغير في مجموع الإزاحة عبر هذا

المقطع في كل لحظة يساوي التدفق الكلي للتيار عبر كل مقطع من الأسلاك الموصلة.

لذلك، التيارات الكهربائية، بما فيها تيارات الإزاحة، دائمًا تتدفق في دوائر مغلقة، وتخضع لقوانين السائل غير القابل للانضغاط بحيث يكون التدفق الكلي عبر كل مقطع من الدائرة—موصل أو عازل—في أي لحظة هو نفسه.

يجب أن نتذكر بوضوح أن هذا الافتراض الأساسي في نظرية ماكسويل هو مجرد افتراض يمكن تبريره بالتجربة. فيور هيلمهولتز، في ورقته حول "معادلات حركة الكهرباء للأجسام الثابتة"، شكل معادلاته بطريقة مختلفة تمامًا عن ماكسويل، وتوصل إلى نتائج أكثر عمومية، لا تتطلب افتراض أن التيارات دائمًا تتدفق في دوائر مغلقة، بل تسمح بتراكم الكهرباء عند نقاط نهاية الموصلات وأماكن بداية الجزء غير الموصل من الدائرة. نترك حاليًا مسألة أي النظريتين، إن وجدت، تمثل الحقائق.

لقد حصلنا أعلاه على ثلاث علاقات أساسية (i)—بين القوة الكهربائية والتيار في موصل؛ (ii) بين القوة الكهربائية والإزاحة الكهربائية في عازل؛ (iii) بين القوة المغناطيسية والتيار الذي يولدها. وقد رأينا أن التيار الكهربائي—أي في العازل، تغير شدة المجال الكهربائي—يولد قوة مغناطيسية. الآن، القوة المغناطيسية التي تؤثر على الوسط تنتج "إزاحة مغناطيسية"، أو ما يُسمى الحث المغناطيسي. في جميع الأوساط عدا الحديد، النيكل، الكوبالت، وبعض المواد الأخرى، يكون الحث المغناطيسي متناسبًا مع القوة المغناطيسية، والنسبة بين الحث

المغناطيسي الناتج عن قوة معينة والقوة نفسها تكون تقريبًا واحدة لجميع هذه الأوساط. هذه النسبة تُعرف بالنفاذية، ويرمز لها عادة بالرمز .μ

يمكن توقع علاقة متبادلة لما ذكر في(iii) ، وقد اكتشفها فاراداي بالفعل. التغيرات في مجال الحث المغناطيسي تولد قوة كهربائية، وبالتالي تيارات إزاحة في العازل أو تيارات توصيل في الموصل. عند النظر في العلاقة بين هذه التغيرات والقوة الكهربائية، من الأبسط في البداية عدم التعامل مع المواد المغناطيسية مثل الحديد والنيكل والكوبالت؛ ثم يمكن القول إن (iv) الشغل الذي يُبذل في أي لحظة في حمل وحدة شحنة كهرباء حول دائرة مغلقة في مجال مغناطيسي ضد القوى الكهربائية الناتجة عن الحقل يساوي معدل تغير الحث المغناطيسي الكلي الذي يمر عبر الدائرة. هذا القانون، الذي يلخص تجارب فاراداي حول التحريض الكهرومغناطيسي، يعطي مبدأ رابعًا، يؤدي إلى سلسلة رابعة من المعادلات التي تربط الكميات الكهربائية والمغناطيسية المشاركة.

المعادلات المستنتجة من المبادئ الأربعة أعلاه، مع الشرط المضمن في استمرارية التيار الكهربائي، تشكل معادلات ماكسويل للحقل الكهرومغناطيسي.

إذا كنا نتعامل فقط مع وسط عازل، يمكن توضيح العلاقة المتبادلة بين المبدأ الثالث والرابع بالتصريح التالي—:
(A)الشغل المبذول في أي لحظة في حمل وحدة كمية من المغناطيسية حول دائرة مغلقة في مجال تتغير فيه الإزاحة الكهربائية، يساوي معدل

تغير مجموع الإزاحة الكهربائية الكلي عبر الدائرة مضروبًا في π.4
(B)الشغل المبذول في أي لحظة في حمل وحدة كمية من الكهرباء حول دائرة في مجال يتغير فيه الحث المغناطيسي، يساوي معدل تغير الحث المغناطيسي الكلي عبر الدائرة.

من هذين المبدأين، وبالاقتران مع القوانين التي تربط القوة الكهربائية بالإزاحة، والقوة المغناطيسية بالحث، ومع شرط الاستمرارية، حصل ماكسويل على معادلاته للحقل.

تجارب فاراداي حول التحريض الكهرومغناطيسي تثبت صحة المبدأ الرابع. إذ يتضح من تلك التجارب أنه عندما يتغير عدد خطوط الحث المغناطيسي المرتبطة بأي دائرة مغلقة، يُنشأ قوة دافعة كهربائية حول تلك الدائرة. هذه القوة الدافعة الكهربائية، وفق نتائج فاراداي، تُقاس بمعدل نقصان عدد خطوط الحث المغناطيسي التي تمر عبر الدائرة. يطبق ماكسويل هذا المبدأ على جميع الدوائر، سواء كانت موصلة أم لا.

في الحصول على معادلات للتعبير بالرموز عن نتائج المبدأ الرابع، قدم ماكسويل كمية جديدة سماها "الجهد المتجهي". هذه الكمية تظهر في تحليله، ولا يكون معناها الفيزيائي واضحًا في البداية. ومع ذلك، وضع البروفيسور بوينتينغ مبادئ ماكسويل في شكل مختلف قليلًا، مما يتيح فهمًا محددًا لمعنى الجهد المتجهي، واستنتاج معادلات ماكسويل بسهولة أكبر من البيانات الأساسية.

نحن نتعامل مع دائرة ترتبط بها خطوط الحث المغناطيسي، في حين أن عدد هذه الخطوط المرتبطة بالدائرة يتغير. الآن، لنفترض أن التغير

يحدث نتيجة لتحرك خطوط الحث إلى الخارج أو الداخل بحيث تقطع الدائرة. في البداية، لا توجد خطوط مرتبطة بالدائرة. مع نمو الحقل المغناطيسي إلى قوته الحالية، تحركت خطوط الحث إلى الداخل. تم قطع كل عنصر صغير من الدائرة ببعضها، ويمكن إيجاد العدد الكلي المرتبط بالدائرة بجمع تلك المقطوعة لكل عنصر. الآن، وفق تصريح البروفيسور بوينتينغ للمبدأ الرابع لماكسويل، فإن القوة الكهربائية في اتجاه أي عنصر من الدائرة تُوجد بقسمة عدد خطوط الحث المغناطيسي التي قُطعت في ثانية واحدة بواسطة هذا العنصر على طول العنصر.

علاوة على ذلك، يُعرف العدد الكلي لخطوط الحث المغناطيسي التي قُطعت بواسطة عنصر وحدة الطول بأنه مركبة الجهد المتجهي في اتجاه العنصر؛ ومن ثم القوة الكهربائية في أي اتجاه هي معدل نقصان مركبة الجهد المتجهي في ذلك الاتجاه. وهكذا، لدينا معنى فيزيائي للجهد المتجهي، وسنجد أن هذه الكمية مهمة جدًا في النظرية الديناميكية.

البروفيسور بوينتينغ عدل المبدأ الثالث لماكسويل بطريقة مماثلة؛ فهو ينظر إلى تغير الإزاحة الكهربائية كنتيجة لحركة أنابيب الحث الكهربائي، والقوة المغناطيسية على أي دائرة تساوي عدد أنابيب الحث الكهربائي التي تقطع أو قُطعت بواسطة وحدة الطول من الدائرة في الثانية، مضروبة في π.4

من معادلات الحقل، وفقًا لماكسويل، يمكن اشتقاق مجموعتين من المعادلات المتماثلة. مجموعة واحدة تربط معدل تغير القوة الكهربائية

بالكميات المعتمدة على القوة المغناطيسية؛ والأخرى تربط بطريقة مماثلة معدل تغير القوة المغناطيسية بالكميات المعتمدة على القوة الكهربائية. عدة كتاب في السنوات الأخيرة اعتمدوا هذه المعادلات كأساس للعلاقات الحقلية، مؤكدين أنها تؤدي إلى نتائج تتوافق مع التجربة.

لقد حاولنا تقديم بعض الحساب لطريقة ماكسويل التاريخية، التي يتم من خلالها اشتقاق المعادلات من قوانين التيارات الكهربائية والتحريض الكهرومغناطيسي المستخلصة مباشرة من التجربة.

بينما طريقة ماكسويل في الحصول على معادلاته فريدة، لم يكن الوحيد في صياغة ومناقشة المعادلات العامة للحقل الكهرومغناطيسي. ومع ذلك، فإن الخطوات التالية التي سننظر فيها تعود إليه بشكل خاص. النظام الكهربائي أو المغناطيسي هو موضع للطاقة؛ هذه الطاقة جزئيًا كهربائية وجزئيًا مغناطيسية، ويمكن إيجاد عدة تعابير لها. في نظرية ماكسويل، يُفترض بشكل أساسي أن للطاقة موقعًا. "الطاقات الكهربائية والمغناطيسية لأي نظام كهرومغناطيسي"، يقول البروفيسور بوينتينغ، "توجد، إذن، في مكان ما في الحقل." ومن ثم فهي موجودة حيثما يمكن إثبات وجود القوة الكهربائية والمغناطيسية. أظهر ماكسويل أن كل الطاقة الكهربائية يمكن تفسيرها باعتبار أنه في جوار نقطة تكون فيها القوة الكهربائيةR ، هناك كمية من الطاقة لكل وحدة حجم تساوي $KR^2/8\pi$، حيث K هي السعة الاستقرائية للوسط، بينما في جوار نقطة تكون فيها القوة المغناطيسيةH ، تكون الطاقة المغناطيسية لكل وحدة حجم$\mu H^2/8\pi$ ، μهي النفاذية. يفترض، إذن، أنه في كل نقطة من النظام الكهرومغناطيسي تُخزن الطاقة وفق هذه القوانين.

ومن ثم، يشبه الحقل الكهرومغناطيسي نظامًا ديناميكيًا تُخزن فيه الطاقة. هل يمكننا اكتشاف المزيد عن الآلية التي تُحافظ على الأفعال في الحقل؟ الآن، تعتمد حركة أي نقطة من نظام مترابط على حركة النقاط الأخرى؛ عادةً، في أي آلة، هناك عدد معين من النقاط يُسمى نقاط القيادة، حركة هذه النقاط تتحكم في حركة كل الأجزاء الأخرى؛ إذا كانت حركة نقاط القيادة معروفة، يمكن تحديد حركة أي نقطة أخرى. وهكذا، في محرك بخاري يمكن معرفة حركة نقطة على العجلة الطيارة إذا كانت حركة المكبس والاتصالات بين المكبس والعجلة معروفة.

لتحديد القوة المؤثرة على أي جزء من الآلة، يجب أن نجد زخمه، ثم نحسب معدل تغير هذا الزخم. معدل التغير هذا سيعطي القوة. طريقة الحساب اللازمة قدمها أولًا لاغرانج، ثم طورها هاملتون مع بعض التعديلات. يُعرف عادة بمبدأ هاملتون؛ وعندما تُستخدم المعادلات بالشكل الأصلي، تُعرف باسم معادلات لاغرانج.

أظهر ماكسويل كيف يمكن تطبيق هذه الطرق على الحقل الكهرومغناطيسي. طاقة النظام الديناميكي جزئيًا حركية وجزئيًا كامنة. يفترض ماكسويل أن الطاقة المغناطيسية للحقل هي طاقة حركية، والطاقة الكهربائية طاقة كامنة. عندما تُعرف طاقة النظام الحركية، يمكن حساب زخم أي جزء من النظام بالطرق المعروفة. إذا اعتبرنا دائرة في حقل كهرومغناطيسي، يمكننا حساب طاقة الحقل، ومن ثم الحصول على الزخم المقابل لهذه الدائرة. إذا كان الموصل ثابتًا في موضعه، وكان يُسمح فقط بتغير التيار في كل دائرة، فإن معدل تغير الزخم المقابل لأي دائرة سيعطي القوة المؤثرة على تلك الدائرة. الزخم

هنا هو الزخم الكهربائي، والقوة هي القوة الكهربائية. وقد رأينا أن القوة الكهربائية عند أي نقطة في دائرة موصلة تُعطى بمعدل تغير الجهد المتجهي في الاتجاه المعني. ومن ثم يُعرف الجهد المتجهي بالزخم الكهربائي للنظام الديناميكي؛ وبالرجوع إلى التعريف الأصلي للجهد المتجهي، نجد أن الزخم الكهربائي لدائرة يُقاس بعدد خطوط الحث المغناطيسي المترابطة معها.

أيضًا، يمكن التعبير عن الطاقة الحركية لنظام ديناميكي بمربعات ومضاعفات سرعات أجزائه المختلفة. ويمكن أيضًا التعبير عنها بضرب سرعة كل نقطة قيادة في الزخم المقابل لتلك النقطة، وأخذ نصف مجموع المضاعفات. لنفترض أننا نتعامل مع نظام يتكون من عدة دوائر سلكية يجري فيها التيارات، ويمكن تمثيل التيار في كل سلك بسرعة نقطة قيادة في نظامنا الديناميكي. يمكن أيضًا التعبير عن الزخم الكهربائي لكل سلك بهذه التيارات، ولتكن كذلك، ويؤخذ نصف مجموع مضاعفات السرعات والزخم المقابل.

في الحفاظ على التيارات في الأسلاك، نحتاج إلى طاقة لتزويد الحرارة المنتجة في كل سلك؛ ولكن عند بدء التيارات، يُلاحظ أن الطاقة المطلوبة أكبر من اللازمة لتوفير هذه الحرارة. يمكن حساب هذه الزيادة في الطاقة، وعند الحساب نجد أن الزيادة تساوي نصف مجموع مضاعفات التيارات والزخم المقابل لها. إذا تم التعبير عن هذا المجموع باستخدام القوة المغناطيسية، يُلاحظ أنه يساوي$\mu H^2/8\pi$ ، وهي الطاقة المغناطيسية للحقل. عند بدء نظام ديناميكي ضد قوى معروفة، يتم تزويد طاقة أكبر من اللازم للقيام بالعمل ضد القوى؛ هذه الزيادة في الطاقة تقيس الطاقة الحركية المكتسبة من النظام.

ومن ثم، كان ماكسويل مبررًا في اعتبار الطاقة المغناطيسية للحقل طاقة حركية للنظام الميكانيكي، وإذا اعتُبرت شدات التيارات في الأسلاك تمثل سرعات نقاط القيادة، فإن هذه الطاقة تُقاس بموجب السرعات والزخم الكهربائي بنفس الطريقة التي تُقاس بها طاقة النظام الميكانيكي بموجب سرعات وزخم نقاط القيادة.

النظام الميكانيكي الذي تُخزن فيه الطاقة وفقًا لماكسويل هو الأثير. يتم إنشاء حالة حركة أو إجهاد في أثير الحقل. القوى الكهربائية التي تحرك التيارات، وكذلك القوى الميكانيكية التي تؤثر على الموصلات الحاملة للتيارات، ناتجة عن هذه الحالة من الحركة أو الإجهاد في الأثير. لا يجب افتراض أن مصطلح الإزاحة الكهربائية في ذهن ماكسويل يعني إزاحة جسدية فعلية لجزيئات الأثير؛ لكنه مرتبط بطريقة ما بمثل هذه الإزاحة المادية. وفقًا لرؤيته، بدون حركة جزيئات الأثير، لن يكون هناك تأثير كهربائي، لكنه لا يساوي الإزاحة الكهربائية بإزاحة جسيم الأثير.

ومع ذلك، تفسر نظريته الميكانيكية القوى الكهرومغناطيسية بين الموصلات الحاملة للتيارات. تعتمد طاقة النظام على المواضع النسبية للتيارات التي تُكوّنه. الآن، أي نظام ميكانيكي محافظ يميل إلى وضع نفسه بحيث تكون طاقته الكامنة أقل، وطاقة حركته أكبر. ستتجه دوائر النظام، إذن، إلى وضع نفسها بحيث تكون الطاقة الكهربية الحركية للنظام أكبر ما يمكن؛ وستكون هناك حاجة إلى قوى للحفاظ على أي وضع لا يحقق هذا الشرط.

لدينا دليل آخر على صحة القيمة التي تم العثور عليها للطاقة في أن القوى المحسوبة من هذه القيمة تتوافق مع تلك التي تُحدد بالتجربة المباشرة.

مرة أخرى، القوى المؤثرة عند نقاط القيادة المختلفة تنتقل إلى نقاط أخرى بواسطة وصلات الآلة؛ وتدخل الوصلات في حالة إجهاد؛ يوجد إجهاد في جميع أجزاء المادة. عندما نرى قضيب المكبس وعمود المحرك متصلين بواسطة العمود والذراع الرابط، ندرك أن العمل المبذول على المكبس ينتقل هكذا إلى العمود. بنفس الطريقة، في الحقل الكهرومغناطيسي، يشكل الأثير الاتصال بين الدوائر المختلفة في الحقل؛ القوى التي تؤثر بها تلك الدوائر على بعضها البعض تُنقل من دائرة إلى أخرى عن طريق الإجهادات التي تُحدث في الأثير.

لنأخذ مثالًا آخر، النظر إلى التجاذب الكهروستاتيكي بين جسمين مشحونين. لنفترض أن الجسمين مشحونان بالاتصال بكل منهما بقطب البطارية المقابل؛ يجري تيار من البطارية مما يؤدي إلى إنشاء إزاحة كهربائية في الفضاء بين الجسمين، وإدخال الأثير في حالة إجهاد. مع زيادة الإجهاد، يقل التيار؛ وتتولد قوة رد فعل من الإجهاد تحاول إيقافه، حتى يتوقف التيار تمامًا. في هذه الحالة، يمكن إزالة الأسلاك من البطارية، شريطة أن يتم ذلك دون تدمير عزل الجسمين؛ ستظل حالة الإجهاد قائمة وتظهر في التجاذب بين الجسمين.

عند النظر إلى المشكلة بهذه الطريقة، نواجه سؤالين كبيرين: الأول، ما حالة الإجهاد في الأثير التي تمكنه من إنتاج التجاذبات والتنافرات الكهروستاتيكية الملاحظة بين الأجسام المشحونة؟ والثاني، ما البنية

الميكانيكية للأثير التي ستُحدث حالة الإجهاد هذه بحيث تفسر القوى الملاحظة؟ يعطي ماكسويل إجابة للسؤال الأول؛ ليست الإجابة الوحيدة الممكنة، لكنها تفسر الحقائق. أما السؤال الثاني، فلم يتمكن من الإجابة عليه. كما يقول ("الكهرباء والمغناطيسية"، المجلد الأول، ص. 132):

"يجب أن يُؤخذ في الاعتبار بعناية أننا لم نخطُ إلا خطوة واحدة فقط في نظرية تأثير الوسط. لقد افترضنا أن الوسط في حالة إجهاد، لكننا لم نحاول بأي شكل تفسير هذا الإجهاد أو توضيح كيفية المحافظة عليه... لم أتمكن من اتخاذ الخطوة التالية، وهي تفسير هذه الإجهادات بالاعتبارات الميكانيكية في العازل".

أشار فاراداي إلى أن التأثير التحريضي بين جسمين يحدث على طول خطوط القوة، وهي خطوط تميل إلى الانكماش في اتجاهها والانتشار في الاتجاهات العمودية عليها. وقد شبّه ماكسويل هذه الخطوط بألياف العضلات التي تنقبض على طولها وتزداد سماكة عند تأثير القوة عليها. ووفقًا لنظرية ماكسويل، فإن المجال الكهربائي يحتوي على حالة من الإجهاد تتمثل في وجود توتر على طول خطوط القوة الكهربائية، وضغط في الاتجاهات العمودية على تلك الخطوط.

وقد أثبت ماكسويل أن وجود توتر مقداره:

$$K R^2 / 8\pi$$

على طول خطوط القوة، مع ضغط مساوٍ له في الاتجاهات العمودية، يؤدي إلى حفظ اتزان المجال وينتج عنه قوى التجاذب أو التنافر المشاهدة بين الأجسام المكهربة. ورغم إمكانية وجود توزيعات أخرى

للإجهاد تعطي النتيجة نفسها، فإن هذا التوزيع ظل مرتبطًا باسم ماكسويل. كما يُلاحظ أن مقدار التوتر على خطوط القوة والضغط العمودي عليها يساوي عدديًا الطاقة الكامنة المختزنة في وحدة الحجوم من المجال، وتكون قيمتها:

$$K R^2 / 8\pi$$

وبالطريقة نفسها، توجد في المجال المغناطيسي حالة إجهاد مماثلة. وطبقًا لنظرية ماكسويل، فإنها تتكون أيضًا من توتر على طول خطوط القوة المغناطيسية وضغط مساوٍ له في الاتجاهات العمودية عليها، بحيث تكون قيمة كل من التوتر والضغط مساوية للطاقة المغناطيسية المختزنة في وحدة الحجوم، أي:

$$\mu H^2 / 8\pi$$

وعندما توجد القوتان الكهربائية والمغناطيسية معًا، فإن حالتي الإجهاد تتراكبان. وتصبح الطاقة الكلية المختزنة في وحدة الحجوم مساوية لـ:

$$K R^2 / 8\pi + \mu H^2 / 8\pi$$

أما الإجهاد الكلي فيتكون من توتر مقداره:

$$K R^2 / 8\pi$$

على طول خطوط القوة الكهربائية، وتوتر مقداره:

$$\mu H^2 / 8\pi$$

على طول خطوط القوة المغناطيسية، إضافة إلى ضغط مساوٍ لهما في الاتجاهات العمودية على هذه الخطوط.

نرى إذن، من نظرية ماكسويل، أن القوة الكهربائية الناتجة في أي نقطة من الفضاء تنتقل من تلك النقطة بفعل الأثير. هنا يطرح السؤال: هل يستغرق الانتقال وقتًا، وإذا كان كذلك، هل يتم بسرعة محددة تعتمد على طبيعة الوسط الذي تنتقل فيه التغيرات؟

وفقًا لنظرية الدوامات الجزيئية، رأينا أن موجات القوة الكهربائية تنتقل بسرعة محددة. كما أن النظرية الأكثر عمومية التي عرضها ماكسويل في كتاب «الكهرباء والمغناطيسية» تؤدي إلى النتيجة نفسها. فالقوة الكهربائية الناتجة عند أي نقطة تنتقل إلى الخارج بسرعة مقدارها:

$$1 / \sqrt{K\mu}$$

وعند نقطة بعيدة تبقى القوة معدومة حتى يصل إليها الاضطراب المنتشر. وإذا استمر هذا الاضطراب مدة زمنية محدودة، فإن تأثيره في أي لحظة لاحقة يظل محصورًا داخل منطقة تقع ضمن غلاف كروي ذي سماكة ثابتة تعتمد على مدة الاضطراب، بينما تزداد أنصاف أقطار هذا الغلاف بسرعة منتظمة مقدارها:

$$1 / \sqrt{K\mu}$$

أما إذا كان الاضطراب الابتدائي دوريًا، فإن موجات دورية من القوة الكهربائية تنتشر من المركز، تمامًا كما تنتشر موجات الصوت من الجرس، أو موجات الضوء من لهب الشمعة. ويمكن لسلك يمر فيه

تيار متردد أن يكون مصدرًا لمثل هذا الاضطراب الدوري، حيث تنطلق منه الموجات وتنتشر في الفضاء المحيط.

من المعروف أن في الموجة الصوتية تتحرك جزيئات الهواء في اتجاه انتشار الموجة؛ أي أنها تكون عمودية على سطح الموجة، وتسمى موجة طولية. أما في موجات الضوء، كما أثبت فرينل، فتكون الإزاحات في مستوى الموجة، أي عمودية على اتجاه الانتشار؛ وتسمى موجات عرضية.

تُظهر النظرية أنه بشكل عام يمكن أن توجد هاتان الموجتان في جسم صلب مرن، وتنتقل بسرعات مختلفة. فما طبيعة موجات الإزاحة الكهربائية في العازل؟ يمكن إثبات أنه كنتيجة ضرورية لآراء ماكسويل حول الطابع المغلق لجميع التيارات الكهربائية، فإن موجات الإزاحة الكهربائية تكون عرضية. تكون الاهتزازات الكهربائية، مثل الضوء، في مستوى الموجة وعند الزوايا القائمة على اتجاه الانتشار؛ وهي تعتمد على صلابة أو شبه صلابة الوسط الذي تنتقل خلاله، وليس على مقاومته للانضغاط.

مرة أخرى، التيار الكهربائي، سواء الناتج عن تغير الإزاحة في العازل أو التوصيل في الموصل، يرافقه قوة مغناطيسية. إذن، ستكون موجة الإزاحة الكهربائية الدورية أيضًا موجة قوة مغناطيسية دورية تنتقل بنفس السرعة؛ وأوضح ماكسويل أن اتجاه هذه القوة المغناطيسية أيضًا في مستوى الموجة، ويكون دائمًا عموديًا على الإزاحة الكهربائية. في النظرية العادية للضوء، ترافق موجة الإزاحة الخطية

موجة من الالتواء الدوري حول اتجاه في مستوى الموجة وعمودي على الإزاحة الخطية.

في كثير من النواحي، تشبه موجات الإزاحة الكهربائية موجات الضوء، وبالفعل، سنجد لاحقًا صلات أوثق بينهما. ومن هنا جاءت نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية للضوء.

تنتقل القوة الكهربائية بحركة موجية فقط في الأوساط العازلة. في الموصلات، على الرغم من أن المبدأين الثالث والرابع لماكسويل ما زالا صحيحين، إلا أن العلاقة بين القوة الكهربائية والتيار الكهربائي تختلف عن تلك التي توجد في العازل. لذا فإن المعادلات التي تحققها القوة في الموصلات تختلف، وقوانين انتشارها تشبه أكثر قوانين توصيل الحرارة منها لقوانين انتقال الضوء.

أيضًا، ينتقل الضوء بسرعات مختلفة في الأوساط الشفافة المختلفة. وسرعة الموجات الكهربائية، كما ذُكر، تساوي:

$$1 / \sqrt{\mu K}$$

غير أن هذا البيان يقوم على افتراض أن القوانين البسيطة التي تنطبق في الفراغ أو في الهواء تنطبق أيضًا على العوازل الصلبة والسائلة. ففي الأجسام الصلبة أو السائلة، كما في الفراغ، تُنقل الموجات عبر الأثير.

ونفترض، كخطوة أولى نحو بناء نظرية كاملة، أن تأثير المادة على الموجات الكهربائية يظهر فقط في تغيّر السعة الاستقرائية أو النفاذية. ومع ذلك، فمن غير المحتمل أن يكون هذا الافتراض هو التفسير

الكامل للحقيقة، ولذلك يمكن توقع أن النتائج المستخلصة منه ليست إلا نتائج تقريبية.

تُظهر التجارب الكهرومغناطيسية، باستثناء المواد المغناطيسية، أن النفاذية لجميع الأجسام متقاربة جدًا، وتختلف قليلًا عن نفاذية الهواء. ومع ذلك، تختلف السعة الاستقرائية للأجسام المختلفة، ومن ثم تختلف سرعة الموجات الكهرومغناطيسية فيها.

تعتمد انكسار موجات الضوء على حقيقة أن الضوء يسافر بسرعات مختلفة في الأوساط المختلفة، لذا يمكن توقع أن موجات الإزاحة الكهربائية ستنعكس وتنكسر عند انتقالها من عازل إلى آخر، مثل الهواء إلى الزجاج أو الغوتا بيركا؛ علاوة على ذلك، لموجة الضوء يكون معامل انكسار الوسط مثل الزجاج هو نسبة السرعة في الهواء إلى سرعتها في الزجاج.

وبالتالي فإن معامل الانكسار الكهربائي للزجاج يساوي نسبة سرعة الموجات الكهربائية في الهواء إلى سرعتها في الزجاج.

ليكن K_0 السعة الاستقرائية للهواء، و K_1السعة الاستقرائية للزجاج، مع افتراض أن النفاذية في كلٍ من الهواء والزجاج متساوية، نحصل على العلاقة:

معامل الانكسار الكهربائي $= \sqrt{(K_1 / K_0)}$

وتُعرف نسبة السعة الاستقرائية للزجاج إلى السعة الاستقرائية للهواء باسم السعة الاستقرائية النوعية للزجاج.

ومن ثم، تكون السعة الاستقرائية النوعية لأي وسط مساوية لمربع معامل الانكسار الكهربائي لذلك الوسط.

منذ زمن ماكسويل، تم دراسة القوانين الرياضية لانعكاس وانكسار الموجات الكهربائية من قبل عدة كتاب، وأثبت أنها تتفق تمامًا مع قوانين فرينل للضوء.

حتى الآن ناقشنا انتشار الموجات الكهربائية في وسط متساوي الخواص، أي له خصائص متطابقة في جميع الاتجاهات حول نقطة. لننظر الآن كيف تتغير هذه القوانين إذا كان العازل بلوريًا.

يفترض ماكسويل أن الطابع البلوري للعازل يمكن تمثيله كفاية بافتراض أن السعة الاستقرائية تختلف في اتجاهات مختلفة؛ وقد أثبتت التجارب لاحقًا أن هذا صحيح في بلورات مثل إسبر البلطيقي وأراجونايت. ويفترض أيضًا، وهذا مبرر بالتجربة، أن النفاذية المغناطيسية لا تعتمد على الاتجاه. من هذه الافتراضات، سيحدث في البلورة انكسار مزدوج واستقطاب للموجات الكهربائية الساقطة عليها؛ وعلاوة على ذلك، ستكون قوانين الانكسار المزدوج كما قدمها فرينل لموجات الضوء في وسط مزدوج الانكسار. ستكون هناك موجتان في البلورة، ويكون الاضطراب في كل منهما مستويًا مستقطبًا؛ يمكن إيجاد سرعتهما وموقع مستوى استقطابهما من اتجاه انتشارهما باستخدام طريقة فرينل بدقة.

تبدو نظرية ماكسويل إذن تشير إلى وجود صلة وثيقة بين الموجات الكهربائية وموجات الضوء. أظهرت تجارب فاراداي على دوران مستوى الاستقطاب بفعل القوة المغناطيسية ظاهرة توضح أحد أوجه

هذه الصلة، وحاول ماكسويل تطبيق نظريته لتفسيرها. هنا، أصبح من الضروري إدخال فرضية إضافية—لابد من وجود صلة بين حركة الأثير المسؤولة عن القوة المغناطيسية وتلك التي تتعلق بالضوء. من المستحيل تقديم تفسير ميكانيكي لدوران مستوى الاستقطاب دون افتراض العلاقة بين هذين النوعين من الحركة. لذا يفترض ماكسويل أن الإزاحات الخطية لنقطة في الأثير هي ما يولد الضوء، بينما ترتبط مكونات القوة المغناطيسية بهذه الإزاحات كما ترتبط مكونات الدوامة في سائل متحرك بالتحركات الخطية للسائل. كما يفترض وجود حد ذو شكل خاص في التعبير عن الطاقة الحركية، ومن هذه الافتراضات يستنتج قوانين انتشار الضوء المستقطب في حقل مغناطيسي. وتتفق هذه القوانين في معظمها مع نتائج تجارب فرديه.(Verdet)

الفصل العاشر

تطوير نظرية ماكسويل

لقد حاولنا في الصفحات السابقة تقديم بعض المعلومات حول مساهمات ماكسويل في النظرية الكهربائية وفي فيزياء الأثير. والآن يجب أن نعتبر بإيجاز شديد الأدلة المتوفرة لدعم هذه الآراء. عند وفاة ماكسويل، كانت هذه الأدلة، رغم قوتها، غير مباشرة. وكان مؤيدوه محدودين ببعض التلاميذ الناطقين بالإنجليزية، الشباب والحماسيين، الذين اقتنعوا، ربما إلى حد كبير، بالمودة والاحترام اللذين كانوا يكنونهما لمعلمهم. في الخارج، لم تحقق آراؤه تقدمًا يُذكر.

في كلمات ختامية لكتابه، كتب ماكسويل متحدثًا عن عدد من العلماء البارزين:

"يبدو أن هناك، في أذهان هؤلاء العلماء المرموقين، بعض التحيز أو الاعتراض المسبق ضد فرضية وجود وسط تتم فيه ظواهر إشعاع الضوء والحرارة، والأفعال الكهربائية عن بُعد. صحيح أنه في وقت ما، كان من يضارب في أسباب الظواهر الفيزيائية يفسر كل نوع من الأفعال عن بُعد عن طريق سائل أثيري خاص، وظيفته وصفاته إنتاج هذه الأفعال. لقد ملأوا كل الفضاء ثلاثة أو أربعة أضعاف بأنواع مختلفة من الأثير، خصائصها مخترعة لمجرد "حفظ المظاهر"، بحيث كان الباحثون الأكثر عقلانية على استعداد لقبول قانون نيوتن المحدد للتجاذب عن بُعد، وحتى معتقد كوتس بأن الفعل عن بعد هو أحد

الخصائص الأساسية للمادة، وأن أي تفسير لا يمكن أن يكون أكثر وضوحًا من هذه الحقيقة. ومن ثم، فإن النظرية الموجية للضوء واجهت معارضة كبيرة، لم تكن ضد فشلها في تفسير الظواهر، بل ضد افتراضها وجود وسط ينتقل فيه الضوء".

"لقد رأينا أن التعبير الرياضي للفعل الكهروديناميكي أدى، في ذهن غاوس، إلى الاقتناع بأن نظرية انتشار الفعل الكهربائي مع الزمن ستكون حجر الزاوية للكهروديناميكا. الآن لا يمكننا تصور الانتشار في الزمن إلا إما كتحرك مادة مادية عبر الفضاء، أو كانتشار حالة حركة أو إجهاد في وسط موجود بالفعل في الفضاء".

"في نظرية نيومان، المفهوم الرياضي المسمى 'الجهد'، الذي لا يمكننا تصوره كمادة مادية، يُفترض أنه يُسقط من جسيم إلى آخر بطريقة مستقلة تمامًا عن أي وسط، وكما أشار نيومان نفسه، فهي تختلف كثيرًا عن طريقة انتشار الضوء".

"في نظريات ريمان وبيتي، يبدو أن الفعل يُفترض أنه ينتشر بطريقة أكثر شبهًا بالضوء".

"لكن في كل هذه النظريات يبرز السؤال الطبيعي: إذا كان شيء ما يُنقل من جسيم إلى آخر عن بُعد، ما حالته بعد مغادرته الجسيم الأول وقبل وصوله للجسيم الآخر؟ إذا كان هذا الشيء هو الطاقة الكامنة بين الجسيمين، كما في نظرية نيومان، فكيف نتخيل وجود هذه الطاقة في نقطة من الفضاء لا تتطابق مع أي من الجسيمين؟ في الواقع، كلما نُقلت الطاقة من جسم إلى آخر مع الزمن، لابد من وجود وسط أو مادة توجد فيها الطاقة بعد مغادرة جسم قبل وصولها إلى الآخر، فكما قال

توريتشيللي، "الطاقة جوهر دقيق جدًا لا يمكن احتواؤه إلا في أعمق مادة للأشياء المادية." ومن ثم، تؤدي كل هذه النظريات إلى تصور وجود وسط يتم فيه الانتشار، وإذا اعترفنا بهذا الوسط كافتراض، أعتقد أنه ينبغي أن يشغل مكانة بارزة في تحقيقاتنا، ويجب أن نسعى لبناء تمثيل ذهني لكل تفاصيل عمله، وهذا كان هدفي الدائم في هذا الكتاب".

لذلك، لننظر الآن إلى الأسس التجريبية في زمن ماكسويل لقبول آرائه حول الفعل الكهربائي، وكيف أن براعة هاينريش هرتز وعمل أتباعه جعلت هذه الأسس قوية جدًا بحيث أن التقدم الكبير في العلوم الكهربائية خلال العشرين سنة الأخيرة كان عبارة عن تطوير للأفكار الموجودة في "الرسالة في الكهرباء والمغناطيسية."

النتائج الكهربائية البحتة لنظرية ماكسويل كانت بالطبع متوافقة مع جميع الملاحظات الكهربائية المعروفة. معادلات الحقل فسرت القوى الكهرومغناطيسية المرصودة في التجارب المختلفة، ومن خلالها يمكن استنتاج قوانين الحث الكهرومغناطيسي بشكل صحيح؛ لكن لم يكن هناك شيء خاص جدًا في ذلك، فمعادلات مشابهة قد تم الحصول عليها من نظرية الفعل عن بعد من قبل عدة كتاب. في الواقع، كانت نظرية هلمهولتز، المبنية على أعمق تعبير عام عن القوة بين عنصرين من التيار ومتوافقة مع بعض تجارب أمبير، أكثر عمومية من نظرية ماكسويل.

الميزات المميزة لنظرية ماكسويل كانت:

1. افتراض أن جميع التيارات تتدفق في دوائر مغلقة.

2. فكرة وجود الطاقة في كل الحقل الكهرومغناطيسي نتيجة للشدود والإجهادات التي تحدث في الوسط الكهرومغناطيسي نتيجة الأفعال الممارسة عليه.

3. تحديد هذا الوسط الكهرومغناطيسي بأنه الأثير الضوئي، والنتيجة أن الضوء هو ظاهرة كهرومغناطيسية.

4. الرأي بأن القوى الكهرومغناطيسية تنشأ بالكامل من الشدود والإجهادات في الأثير؛ والشحنة الكهربائية لموصل معزول هي إحدى صور تجلي إجهاد الأثير لنا.

5. يُقال إن العازل تحت تأثير القوة الكهربائية يصبح مستقطبًا، ووفقًا لماكسويل، فإن كل الكهربة هي الأثر المتبقي لاستقطاب العازل.

والآن يجب الاعتراف أنه في زمن ماكسويل كان هناك دليل مباشر على عدد قليل جدًا من هذه الافتراضات. لم يقم أحد حتى الآن بقياس التيارات الإزاحية في العازل بحيث يُظهر أن التدفق الكلي عبر كل مقطع من الدائرة متساوٍ في أي لحظة، رغم وجود تجارب غير مباشرة الآن برهنت صحة فرضية ماكسويل تمامًا. أثبتت تجارب شيلر وهلمهولتز أنه من الصحيح أن بعض الأفعال في العازل يجب أخذها في الاعتبار في أي نظرية مرضية، وبالتالي أبطلت بعض النظريات المبنية على الفعل المباشر عن بعد، "لكنها لم تخبرنا بشيء عن صحة أي شكل محدد من نظرية العازل، مثل ماكسويل أو هلمهولتز".

عند وفاة ماكسويل، لم يكن هناك أدلة تجريبية كثيرة عن الإجهادات التي تحدث في جسم بفعل القوة الكهربائية. لاحظ فونتانا وجوفي ودوتر أن تغييرات تحدث في حجم عازل المكثف عند شحنه. قام كوينكه بمواصلة هذا العمل، ونشر أول أوراقه الكلاسيكية في هذا الموضوع عام 1880، أي بعد وفاة ماكسويل بعام واحد. كان ماكسويل نفسه يحب عرض تجربة يتم فيها تقريب كرة معزولة مشحونة إلى سطح شمع البارافين؛ فالإجهاد على السطح يتسبب في تراكم الشمع تحت الكرة.

أظهر كير عام 1875 أن العديد من المواد تصبح ثنائية الانكسار تحت الإجهاد الكهربائي، وقد نُشرت دراسته الكاملة لقوانين هذا الفعل لاحقًا.

أما بالنسبة للقياسات المباشرة للموجات الكهربائية، فلم تكن متاحة في ذلك الوقت؛ إذ تم تحديد سرعة انتشارها اعتمادًا على ملاحظات كهربائية من نوع مختلف تمامًا. فقد قام ويبر وكولراوش بقياس قيمة K للهواء، مع اعتبار $\mu = 1$ ، ومن نتائج ملاحظاتهما تبين أن سرعة الموجات الكهرومغناطيسية تساوي تقريبًا:

3.1×10^9 سنتيمتر في الثانية.

وكانت سرعة الضوء قد عُرفت من تجارب فيزو وفوكو بأنها تقارب القيمة نفسها تقريبًا. وقد كان هذا التقارب الكبير بين القيمتين سببًا في أن يكتب ماكسويل عام 1864 ما يلي:

"يبدو أن توافق النتائج يظهر أن الضوء والمغناطيسية هما تعبير عن نفس الجوهر، وأن الضوء هو اضطراب كهرومغناطيسي ينتقل عبر الحقل وفق قوانين كهرومغناطيسية".

بحلول وقت نشر الطبعة الأولى من كتاب «الكهرباء والمغناطيسية»، كان ماكسويل ولورد كلفن قد حددا قيمةK ، وأظهرا أن القيمة الناتجة لسرعة الموجات الكهرومغناطيسية في الهواء تكاد تساوي سرعة الضوء.

أما بالنسبة للمواد الأخرى، فقد كانت الملاحظات أقل دقة. فقد قام جيبسون وباركلي بقياس السعة الاستقرائية النوعية للبارافين، ووجدوا أن الجذر التربيعي لها يساوي 1.405، بينما كان معامل الانكسار للموجات الطويلة يساوي 1.422. وكان ماكسويل يرى أنه إذا ثبت وجود توافق مماثل في عدد من المواد الأخرى، فيمكن الاستنتاج بأن "الجذر التربيعي لـK ، رغم أنه قد لا يمثل التعبير الكامل لمعامل الانكسار، إلا أنه على الأقل يمثل أهم عنصر فيه."

وبين ذلك الوقت ووفاة ماكسويل، أُجريت أبحاث كافية لدعم هذا الرأي. فقد أظهرت ملاحظات بولتزمان وسيلوف وهوبكنسون وغيرهم أن هناك العديد من المواد التي يكون فيها الجذر التربيعي للسعة الاستقرائية النوعية قريبًا جدًا من معامل الانكسار، كما وُجدت أسباب مقنعة تفسر الفروق الكبيرة التي ظهرت في بعض الحالات.

وجد هوبكنسون أن الزجاج يظهر فروقًا كبيرة، وقد وُجد منذ ذلك الحين اختلاف كبير لمعظم المواد الصلبة المفحوصة، باستثناء البارافين والكبريت. أما بالنسبة لزيوت البترول والبنزين والتولوين

وثنائي كبريتيد الكربون وبعض السوائل الأخرى، فكان توافق نظرية ماكسويل مع التجربة جيدًا. أما الزيوت الدهنية مثل زيت الخروع وزيت الزيتون وزيت الحوت وزيت القدم وغيرها، وكذلك الإيثر، فكانت الفروق كبيرة.

يبدو أن سبب هذا الاختلاف يرجع إلى أن موجات الضوء تمثل اضطرابًا ذا فترة زمنية قصيرة جدًا، في حين أن الملاحظات على المواد المذكورة تكشف عن ظاهرة التشتت الضوئي. وحتى الآن لا توجد نظرية مكتملة تسمح بحساب سرعة الموجات ذات الترددات المنخفضة جدًا اعتمادًا على تجارب الموجات القصيرة.

وفي معظم الحالات، استُخدمت صيغة كوشي للحصول على القيم العددية. ومع ذلك، فإن القيمة التجريبية لـ K تتوافق مع هذه الموجات الطويلة جدًا. وكما قال ج. ج. طومسون:

«الدهشة ليست في عدم وجود مواد لا تتحقق فيها العلاقة $K = \mu^2$، بل في وجود أي مواد تتحقق فيها هذه العلاقة.»

كما أثبت طومسون نفسه وبلوندلو أنه عندما تُقاس قيمة K تحت تأثير كهربة متغيرة بسرعة كبيرة، بمعدل يقارب 25,000,000 مرة في الثانية، فإن السعة الاستقرائية للزجاج تنخفض من نحو 6.8–7 إلى حوالي 2.7؛ ويكون جذرها التربيعي 1.6، وهو قريب من معامل انكسارها.

أما قيم السعة الاستقرائية للبارافين والكبريت، والتي تتفق إلى حد ما مع نظرية ماكسويل، فلم تُظهر تغيرًا كبيرًا بين الحقل الكهربائي الثابت

والحقل المتغير بسرعة عالية.من ناحية أخرى، بعض تجارب أرونس وروبينس في الحقول المتغيرة بسرعة أعطت قيمًا لا تختلف كثيرًا عن طرق أخرى. ومع ذلك، فإن نظرية هذه التجارب قابلة للنقد.

محاولة تقديم تقرير كامل عن التحقق الحديث من آراؤه وتطور نظريته أمر يتجاوز حدود هذا الكتاب، لكن تقريرًا عن ماكسويل مكتوبًا عام 1895 سيكون ناقصًا دون الإشارة إلى أعمال هاينريش هرتز.

أوضح ماكسويل خصائص الموجات الكهرومغناطيسية في الهواء، وقد مكّن هرتز عام 1887 من قياس هذه الخصائص، وأثبتت القياسات صحة آرائه تمامًا.

طريقة إنتاج التذبذبات الكهربائية في الموصل كانت معروفة منذ وقت طويل، وأشار إليها توماسون وهلمهولتز. درس شيلر هذه التذبذبات عام 1874، وحدد السعة الاستقرائية للزجاج باستخدامها، مع تذبذبات فترة كل منها بين 0.000056 و0.00012 ثانية.

هذه التذبذبات كانت تنتج عن تفريغ مكثف عبر ملف سلكي له حث ذاتي. إذا كانت مقاومة السلك الكهربائية غير كبيرة جدًا، فإن الشحنة تتذبذب ذهابًا وإيابًا بين لوحي المكثف حتى تُستهلك طاقتها في الحرارة الصادرة من السلك وفي الإشعاع الكهرومغناطيسي الخارج منه.

فترة هذه التذبذبات تحت ظروف مناسبة تُعطى بالمعادلة:

$$T = 2\pi \sqrt{(CL)}$$

حيث إن L هو معامل الحث الذاتي، و Cهي سعة المكثف. ويمكن حساب هذه القيم ومن ثم معرفة زمن التذبذب بدقة. ومن هذه الترتيبات تتبعث الموجات في الفضاء.

إذا أمكن قياس طول موجة بهذه الطريقة، يمكن تحديد سرعتها بقسمة طول الموجة على الفترة. ولكن بما أن السرعة مماثلة لسرعة الضوء، فإن طول الموجة سيكون كبيرًا جدًا ما لم تكن الفترة قصيرة جدًا.

فمثلاً، موجة تنتقل بسرعة الضوء ولها فترة مقدارها 0.0001 ثانية (مثل موجات شيلر)، يكون طولها:

0.0001 × 30,000,000,000 = 3,000,000سنتيمتر

أي أن طول الموجة يساوي 3,000,000 سنتيمتر.

وسيكون من الصعب قياسها.

قبل قياس الموجات الكهربائية، كان من الضروري: (1) إنتاج موجات بفترة قصيرة كفاية، (2) ابتكار وسائل لاكتشافها. وهذا ما فعله هرتز.

يمكن تقليل طول موجة التذبذبات الكهربائية بخفض السعة الكهربائية للنظام أو معامل الحث الذاتي للسلك، وقد اعتمد هرتز كلا الطريقتين. كان المذبذب في تجاربه الهامة يتكون من لوحين مربعين من النحاس طول ضلع كل منهما 40 سم، ومرتبط بكل منهما سلك نحاسي بطول 30 سم تقريبًا، ينتهي كل سلك بكرة نحاسية صغيرة مصقولة، ويوضع اللوحان بحيث تكون الأسلاك في نفس الخط، والفجوة الهوائية بين الكرات صغيرة جدًا. يُشحن اللوحان، أحدهما إيجابي والآخر سلبي،

حتى تنكسر مقاومة الهواء ويمر تفريغ عبر الفجوة. تحت هذه الظروف، يكون التفريغ متذبذبًا: سلسلة من الشرارات تمر ذهابًا وإيابًا حتى تُشع الطاقة الأصلية في الفضاء أو تتحول إلى حرارة؛ ثم يُعاد شحن اللوحين وتتكرر العملية.

في تجارب هرتز، كان المذبذب مشحونًا بواسطة طرفي ثانوي لفافة تحريضية.

عام 1883، أشار الأستاذ فيتزجيرالد إلى هذه الطريقة لإنتاج الموجات الكهربائية في الهواء، وأعطى طول موجة أدنى يبلغ مترين. وفي 1870، قام هير فون بيزولد بالفعل بملاحظات على انتشار وانعكاس التذبذبات الكهربائية، لكن عمله، المنشور كإعلان أولي، لم يلقَ اهتمامًا كبيرًا. كان هرتز أول من بدأ عام 1887 بالتحقيق المنهجي في الموجات الكهربائية في الهواء المنبعثة من مذبذب كهربي لاختبار نظريات مختلفة للفعل الكهرومغناطيسي.

لكن كان لا بد من ابتكار جهاز لكشف الموجات. عندما تصطدم الموجات بموصل، تحدث ارتفاعات كهربائية فيه ويمكن، تحت ظروف مناسبة، ملاحظتها كشرارات صغيرة. استخدم هرتز للكشف حلقة سلكية تنتهي نهايتها بكرتين نحاسيتين صغيرتين، بحيث تكون الشرارات مرئية عند مرورها عبر الفجوة الهوائية.

مثل هذا السلك له فترة محددة لتذبذبات الكهرباء التي قد يشحن بها، وإذا توافقت ترددات الموجات الكهربائية الساقطة عليه مع تلك التي يمكن أن يشعها بنفسه، ستكون التذبذبات في السلك أقوى، وتكون الشرارات أكثر بريقًا. كان رنان هرتز دائرة سلكية نصف قطرها 35

سم، وفترة مثل هذا الرنان ستكون، حسب حسابه، مساوية لفترة المذبذب.

ومع ذلك، هناك صعوبة كبيرة في تحديد فترة المذبذب الكهربائي من أبعاده، والقيمة المحسوبة لفترة رنان هرتز ليست موثوقة جدًا. الفترة الكاملة، مع ذلك، تقريبًا تعادل اثنين من مئة مليون من الثانية؛ وفي أوراقه الأصلية، أعطى هرتز قيمة أكبر نتيجة خطأ.

بهذه الترتيبات، تمكن هرتز من كشف وجود الإشعاع الكهربائي على مسافات كبيرة من المذبذب، كما تمكن من قياس طول الموجة. في حالة الموجات الصوتية، من المعروف وجود عقد وحلقات عند ظروف مناسبة، وتنتج عند الانعكاس المباشر للموجات على سطح مستوي تداخلًا بين الموجات الساقطة والمنعكسة، وتتشكل اهتزازات ثابتة، وتظهر العقد والحلقات (أماكن الحد الأدنى والأقصى للحركة). يمكن تحديد موقع هذه العقد والحلقات باستخدام أجهزة مناسبة، وبالتالي إيجاد طول الموجة (نصف الطول بين العقدتين المتتاليتين).

بنفس الطريقة، عندما تسقط التذبذبات الكهربائية على عاكس، مثل سطح معدني كبير، تنتج اهتزازات ثابتة نتيجة التداخل بين الموجات الساقطة والمنعكسة، وينتج عنها عقد وحلقات كهربائية. يمكن تحديد مواقع هذه العقد والحلقات باستخدام أجهزة هرتز أو طرق أخرى، وبالتالي إيجاد طول الموجات الكهربائية. وجود العقد والحلقات يظهر أن التأثيرات الكهربائية تنتقل بواسطة الحركة الموجية، ويُلاحظ أن طول الموجات ثابت لأن العقد والحلقات تتكرر على فواصل متساوية.

إذا افترضنا معرفة التردد، يمكن تحديد سرعة انتشار الموجة. وجد هرتز من تجاربه أن الموجات تسافر في الهواء بسرعة الضوء. يبدو، مع ذلك، أن هناك خطأين في الحساب، وقد صحح أحدهما الآخر، بحيث لم يكن التردد المعلن في ورقة هرتز ولا طول الموجة المقاس صحيحًا.

عن طريق تعديل الأجهزة، كان من الممكن قياس طول موجة الموجات المنتقلة عبر سلك نحاسي، وبالتالي، بافتراض فترة التذبذب، حساب سرعة انتشار الموجة في السلك. أجرى هرتز التجربة، ووجد من ملاحظاته الأولى أن الموجات تنتشر في السلك بسرعة محددة، لكنها تختلف عن السرعة في الهواء. كان نصف طول الموجة في السلك حوالي 2.8 متر، وفي الهواء حوالي 4.5 متر.

الآن، قدمت هذه التجربة اختبارًا حاسمًا بين نظريات ماكسويل وهلمهولتز. وفقًا لماكسويل، لا تنتقل الموجات في السلك على الإطلاق، بل تنتقل عبر الهواء بجانبه، وكان يجب أن يكون طول الموجة الملاحظ من هرتز مساويًا للهواء. وفقًا لهلمهولتز، يجب أن تختلف السرعتان الملاحظتان، كما كان فعلاً، وبدت التجربة وكأنها تثبت أن نظرية ماكسويل غير كافية وأن نظرية أكثر عمومية، مثل هلمهولتز، ضرورية. لكن تجارب أخرى لم تؤد إلى نفس النتيجة. وجد هرتز نفسه، باستخدام تذبذبات أسرع في قياسات لاحقة، أن طول الموجات الكهربائية من مذبذب معين كان نفس الطول سواء انتقلت عبر الفضاء الحر أو عبر سلك. توصل كل من ليشر وج. ج. طومسون إلى نفس النتيجة؛ لكن أكمل التجارب في هذا المجال كانت لتجارب ساراسين ودي لا ريف.

يمكن اعتباره مؤكدًا الآن أن نظرية ماكسويل كافية، وأن العمومية الأكبر لنظرية فون هلمهولتز ليست ضرورية.
في ورقة لاحقة، أظهر هرتز أن الموجات الكهربائية يمكن أن تنعكس وتتكسر، ويمكن استقطابها وتحليلها تمامًا كما هو الحال مع موجات الضوء. وفي مقدمته لمجموعته المنشورة "الأوراق المجمعة" كتب (ص. 19):

"إذا ألقينا نظرة إلى الوراء، نرى أن التجارب الموضحة أعلاه أثبتت لأول مرة انتشار ما يُفترض أنه فعل عن بعد مع الزمن. هذه الحقيقة تمثل النتيجة الفلسفية للتجارب، وفي واقع الأمر تُعد، إلى حد كبير، النتيجة الأهم. يشمل الإثبات الاعتراف بأن القوى الكهربائية يمكن أن تنفصل عن الأجسام المادية، وتستمر في الوجود كظروف أو تغيرات في حالة الفضاء. وتثبت تفاصيل التجارب أيضًا أن الطريقة التي تنتقل بها القوة الكهربائية تظهر أقرب تشابه مع انتشار الضوء، بل تكاد تتطابق معه تمامًا. لذلك، تصبح فرضية أن الضوء ظاهرة كهربائية محتملة جدًا. ولإعطاء إثبات صارم لهذه الفرضية، كان من الناحية المنطقية لا بد من إجراء تجارب مباشرة على الضوء نفسه.

"ما نشير إليه هنا باعتباره إنجازًا للتجارب قد تحقق بغض النظر عن صحة النظريات الفردية. ومع ذلك، هناك ارتباط واضح بين التجارب والنظرية التي أُجريت من أجلها. فمنذ عام 1861، كانت العلوم تمتلك نظرية أنشأها ماكسويل بناءً على آراء فاراداي، والتي نُسميها نظرية فاراداي-ماكسويل. تؤكد هذه النظرية إمكانية مجموعة الظواهر التي اكتشفناها هنا بنفس التأكيد الذي تجبرنا به النظريات الكهربائية

الأخرى على إنكارها. ومن البداية، تفوقت نظرية ماكسويل على جميع غيرها في الأناقة وثراء العلاقات بين الظواهر المختلفة التي تشملها.

"تزايد احتمال هذه النظرية، وبالتالي عدد مؤيديها، عامًا بعد عام. لكن طالما اعتمدت نظرية ماكسويل فقط على احتمال نتائجها، وليس على يقين فرضياتها، لم يكن بالإمكان أن تحل محل النظريات المعارضة لها تمامًا.

كانت الفرضيات الأساسية لنظرية ماكسويل تتناقض مع الآراء الشائعة، ولم تكن مستندة إلى أدلة حاسمة. وفي هذا السياق، يمكننا وصف هدف ونتيجة تجاربنا بأفضل طريقة بالقول: كان هدف هذه التجارب اختبار الفرضيات الأساسية لنظرية فاراداي-ماكسويل، ونتيجة التجارب هي تأكيد هذه الفرضيات الأساسية".

منذ وفاة ماكسويل، كُتبت مؤلفات كثيرة حول المسائل الكهربائية، كلها مستوحاة من أعماله. لقد تغير الموقف الذي يُنظر من خلاله إلى النظرية الكهربائية بالكامل. وقد وجد أعظم أساتذة الفيزياء الرياضية في تطوير آراء ماكسويل مهمة تتطلب جميع قدراتهم، وكانت النتائج الجديدة التي تحققت غنية جدًا. ومع ذلك، يُطرح السؤال كثيرًا: ما هي نظرية ماكسويل؟ وهرتز نفسه اختتم مقدمته بالإجابة الأكثر إثارة للاهتمام على هذا السؤال. وقد تناول الأستاذ بولتزمان النظرية في دورة محاضرات مهمة. أما بوانكاريه، في مقدمة كتابه "محاضرات حول نظريات ماكسويل والنظرية الكهرومغناطيسية للضوء"، فيعبر عن الصعوبة التي يشعر بها الكثيرون في فهم ماهية النظرية. يقول: "عند أول مرة يفتح فيها القارئ الفرنسي كتاب ماكسويل، يختلط شعور

من القلق، وأحيانًا من عدم الثقة، بالإعجاب. وفقط بعد دراسة مطولة وبذل الكثير من الجهود يزول هذا الشعور. بعض العقول الكبيرة تبقيه دائمًا." ويضيف مرة أخرى: "قال لي عالم فرنسي، من الذين فهموا معنى ماكسويل تمامًا، مرة: أفهم كل شيء في الكتاب إلا ما يعنيه جسد مشحون بالكهرباء".

وفي النظر في هذا السؤال، تعتبر ملاحظة بوانكاريه الخاصة – "ماكسويل لا يقدم تفسيرًا ميكانيكيًا للكهرباء والمغناطيسية، بل يهدف فقط إلى إظهار أن مثل هذا التفسير ممكن" – ذات أهمية بالغة.

لا يمكننا أن نجد في كتاب "الكهرباء" إجابة على سؤال: ما هو الشحنة الكهربائية؟ ماكسويل لم يدّعِ معرفته، ومحاولة إعطاء وضوح كبير لآرائه في هذا الموضوع قد تؤدي إلى سوء فهم لما كانت تلك الآراء.

في النظريات القديمة حول الفعل عن بعد ووجود سوائل كهربائية ومغناطيسية تتجاذب وفق قوانين معروفة، كان من السهل أن تكون الأمور ميكانيكية. كان كل ما يجب فعله هو دراسة كيفية توزيع هذه السوائل لتحقيق التوازن، وحساب القوى الناتجة عن هذا التوزيع. أما مشكلة إعطاء بنية ميكانيكية للأثير تمكنه من إحداث الفعل في الحقل الكهرومغناطيسي فهي أصعب، وحتى تُحل، يبقى السؤال: ما هي الشحنة الكهربائية؟ بلا إجابة. ومع ذلك، لفهم نظرية ماكسويل، ليست هذه المعرفة ضرورية.

خصائص الأثير في العوازل والمواصلات يجب أن تكون مختلفة تمامًا. ففي العازل، يمتلك الأثير القدرة على تخزين الطاقة من خلال

تغيير في تكوينه أو بنيته، أما في الموصل، فهذه القدرة غائبة، على الأرجح بسبب تأثير المادة التي يتكون منها الموصل.

عندما نقول إننا نشحن موصلًا معزولًا، فإننا في الواقع نؤثر على الأثير المحيط بالجسم لتخزين الطاقة فيه؛ وإذا كان هناك موصل آخر في الحقل، فلا يمكننا تخزين الطاقة في الأثير الذي يحتويه. وعندما ننتقل من خارج الموصل إلى داخله، يحدث تغير مفاجئ في بعض الكميات الميكانيكية المتعلقة بالأثير، ويظهر هذا التغير كقوة جذب بين الموصلين.

سماها ماكسويل التغير في البنية أو الخاصية الذي يحدث عندما يخزن العازل الطاقة الكهروستاتيكية باسم الإزاحة الكهربائية؛ وإذا رمنا لها بـD ، فإن القوة الكهربائية R تساوي πD/K4، ومن ثم تكون الطاقة في وحدة الحجم πD²/K2، حيث K كمية تعتمد على العازل.

D، الإزاحة الكهربائية، هي كمية لها اتجاه ومقدار، ويمكن تمثيل قيمتها في أي نقطة بخط مستقيم كما هو معتاد؛ داخل الموصل تكون صفرًا. التغير الكلي فيD ، الذي يحدث على سطح الموصل عند الدخول من الخارج، يقيس إجمالي الشحنة على الموصل. عند النقاط التي تدخل فيها خطوط D إلى الموصل تكون الشحنة سالبة، وعند النقاط التي تخرج منها تكون الشحنة موجبة؛ وعلى طول خطوط الإزاحة يوجد توتر في الأثير يقاس بـ πD²/K2، وعلى نحو متعامد على هذه الخطوط يوجد ضغط بنفس المقدار.

إضافةً إلى ما سبق، يجب أن تحقق مكونات الإزاحة D علاقات معينة يمكن التعبير عنها فقط بالصيغة الرياضية، ومن الصعب شرح معناها الفيزيائي بلغة غير رياضية.

عند التعبير عن هذه العلاقات، يصبح من الممكن تحديد قيمة الإزاحة في جميع نقاط الفضاء، ويمكن عندئذ حساب القوى المؤثرة على الموصلات. كما يمكن حساب التغير الكلي للإزاحة عند الدخول أو الخروج من الموصل، وهذا يعطي الكمية المعروفة باسم إجمالي الشحنة الكهربائية على الموصل .القوى المحسوبة بهذه الطريقة هي نفسها تمامًا كما لو افترضنا أن كل موصل مشحون بالشحنات المحسوبة بالمعنى العادي، ويتجاذب أو يتنافر وفق القوانين المعتادة.

إذا عرفنا الإزاحة الكهربائية بأنها التغير الذي يحدث في العازل عند تخزينه للطاقة الكهروستاتيكية، وافترضنا أن هذا التغير، مهما كان ميكانيكيًا، يخضع لقوانين معروفة، وينتج عنه ضغوط وتوترات في العازل، فإن المسائل الكهروستاتيكية يمكن حلها دون الرجوع إلى الشحنة الكهربائية على الموصلات.

يبدو أن هذا، في رأيي، هو نظرية ماكسويل للكهرباء كما تنطبق على الكهروستاتيكا .لفهمها، ليس من الضروري معرفة طبيعة التغير في الأثير الذي يشكل الإزاحة الكهربائية، أو ما هي الشحنة الكهربائية، رغم أن معرفة ذلك ستجعل النظرية أكثر وضوحًا وستحولها إلى نظرية ميكانيكية.

عند الانتقال إلى المغناطيسية والكهرومغناطيسية، تتطور نظرية ماكسويل بشكل طبيعي. التجارب تثبت أن التحريض المغناطيسي

مرتبط بمعدل تغير الإزاحة الكهربائية وفق القوانين المذكورة. إذا عرفنا طبيعة التغير الذي يطلق عليه اسم "الإزاحة الكهربائية"، ستكون طبيعة التحريض المغناطيسي معروفة. صحيح أن هناك صعوبات كبيرة أمام أي تفسير ميكانيكي، ولكن بافتراض إمكانية وجود تصور ميكانيكي للإزاحة الكهربائية، تقدم نظرية ماكسويل تفسيرًا متسقًا للظواهر الأخرى للكهرومغناطيسية.

نعم، لدينا نظرية كهرومغناطيسية للضوء، لكننا لا نعرف طبيعة التغير في الأثير الذي يسبب الإحساس بالضوء في أعيننا. هل هو نفس الإزاحة الكهربائية، أم التحريض المغناطيسي، أم أن الإحساس بالضوء نتيجة التأثير المشترك لهذين الاثنين؟

تظل هذه الأسئلة بلا إجابة. قد يكون الضوء ليس إزاحة كهربائية ولا تحريضًا مغناطيسيًا، بل تغيرًا دوريًا مختلفًا تمامًا في بنية الأثير، ينتقل فيه بنفس سرعة هذه الكميات ويخضع للعديد من القوانين نفسها.

في هذا الصدد، هناك فرق جوهري بين النظرية التقليدية للضوء والنظرية الكهرومغناطيسية. الأولى نظرية ميكانيكية؛ تفترض أن التغير الدوري الذي يشكل الضوء هو الإزاحة الخطية العادية للوسط – الأثير – الذي له خصائص ميكانيكية معينة، ومن هذه الخصائص تستنتج قوانين البصريات.

لور

د كيلفن، في الأثير المتقلب الخاص به، ابتكر وسطًا يمكن أن يوجد ويملك الخصائص الميكانيكية اللازمة. ستخضع الإزاحات الخطية الدورية للأثير المتقلب لقوانين الضوء، ومن الفرضيات الأساسية

للنظرية، يمكن إعطاء تفسير ميكانيكي مرضٍ إلى حد معقول لمعظم الظواهر البصرية الخالصة. لكن العلاقات بين الضوء والكهرباء أو الضوء والمغناطيسية لا تمسها هذه النظرية؛ في الواقع، لا يمكن لمسها دون افتراض ما هي الإزاحة الكهربائية.

في السنوات الأخيرة، قُدمت اقتراحات مختلفة حول طبيعة التغير الذي يشكل الإزاحة الكهربائية. واحدة من النظريات، بسبب فون هلمهولتز، تفترض أن الزخم الكهروحركي، أو الجهد المتجه لماكسويل، هو في الواقع زخم الأثير المتحرك؛ وفقًا لنظرية أخرى، ظهرت أولًا بشكل بدائي على يد تشاليس، وتم تطويرها مؤخرًا بتفصيل مرضٍ من قبل لارمور، حيث يكون سرعة الأثير هي القوة المغناطيسية؛ وهناك اقتراحات أخرى، لكننا لا نزال ننتظر نيوتن الثاني ليقدم لنا نظرية للأثير تشمل الكهرباء والمغناطيسية، والإشعاع الضوئي، وربما الجاذبية.

في هذه الأثناء، نعتقد أن ماكسويل قد أخذ الخطوات الأولى نحو هذا الاكتشاف، وأشار إلى الخطوط التي يجب على المكتشف المستقبلي أن يوجه بحثه عليها، ومن هنا نطالب له بمكانة بارزة بين قادة هذا القرن العلمي.

المراجع المستخدمة

[1] A Treatise on Electricity and Magnetism. James Clerk Maxwell. Oxford University Press, 1873.

[2] On Physical Lines of Force. James Clerk Maxwell. Philosophical Magazine, 1861–1862.

[3] A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. James Clerk Maxwell. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1865.

[4] Matter and Motion. James Clerk Maxwell. London: Society for Promoting Christian Knowledge, 1876.

[5] The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. Edited by W. D. Niven. Cambridge University Press, 1890.

[6] Electricity and Magnetism. Edward M. Purcell. Berkeley Physics Course, McGraw-Hill, 1963.

[7] Classical Electricity and Magnetism. Addison-Wesley, 1962.

[8] The Feynman Lectures on Physics, Volume II. Addison-Wesley, 1964.

[9] Introduction to Electrodynamics. Pearson, 2017.

[10] Maxwell's Equations and the Foundations of Electromagnetism. Cambridge University Press, 2010.

نبذة عن المؤلف

أ.م.د يحيى حمدي محمد إبراهيم البشار

- أستاذ مساعد دكتور في علوم المواد (فيزياء)
- دكتوراة الفلسفة في العلوم (تخصص فيزياء) – كلية العلوم- جامعة الأزهر بالقاهرة - مصر
- ماجيستير هندسة الجوامد و التصنيع- كلية الهندسة - جامعة انها – كوريا الجنوبية
- دبلوم تربوي – تعليم الكتروني- كلية الدراسات التربوية – الجامعة المصرية الأهلية للتعليم الالكتروني - مصر
- دبلوم تربوي- تربوي عام- كلية الدراسات التربوية – الجامعة المصرية الأهلية للتعليم الالكتروني - مصر
- دبلوم فيزياء إشعاعية- كلية العلوم – جامعة عين شمس - مصر
- دبلوم تفاعل الليزر مع المادة – معهد الليزر – جامعة القاهرة - مصر
- بكالوريوس فيزياء- كلية العلوم – جامعة الأزهر بالقاهرة- مصر

مناصب علمية:

- عضو اللجنة الوطنية للفيزياء بأكاديمية البحث العلمي بجمهورية مصر العربية
- خبير و تكنولوجيا الليزر من نقابة المهن العلمية بالقاهرة بجمهورية مصر العربية
- استشاري الليزر و التكنولوجيا النووية من نقابة المهن العلمية بالقاهرة بجمهورية مصر العربية
- عضوسابق بمجلس شعبة الطبيعة والفلك لمجلس نقابة المهن العلمية بالقاهرة بجمهورية مصر العربية

إصدارات للمؤلف:

له العديد من الأوراق البحثية العلمية والمدرجة في الموقعين الآتيين:

https://scholar.google.com/citations?user=ygx78e8AAAAJ&hl=en

https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56177724400

1- "مقدمة في كيفية كتابة ورقة بحثية", prepared by Omnia Mohamed , Fatma Elbashar, Mohamed Abdelwahab, *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع,10552/2025 ,ISBN: 978-977-95-2754-3 [Arabic language]
2- "أكتب سيرتك الذاتية بطريقة مبسطة وعملية", prepared by Omnia Mohamed , Fatma Elbashar, Mohamed Abdelwahab, *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع, 2026/7972 , ISBN: 978-977-95-6456-2, [Arabic language]
3- "مبادئ الفيزياء الاجتماعية", prepared by Omnia Mohamed , Fatma Elbashar, Mohamed Abdelwahab, *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع, 2024/13156, ISBN: 978-977-94-9583-5 [Arabic language]
4- "فيزياء و كيمياء ريـــــادة الأعـــــمال", prepared by Omnia Mohamed , Fatma Elbashar,

Mohamed Abdelwahab, *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع, 2025/16784 , ISBN: 978-977-95-3378-0, [Arabic language]

5- " لون مع طفلك كتاب تلوين الأشكال الهندسية طرق تعليم الأطفال بالألوان", prepared by Omnia Mohamed , Fatma Elbashar, Mohamed Abdelwahab, *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع, 2026/7970 , ISBN: 978-977-95-6454-8, [Arabic language]

6- " لون مع طفلك كتاب تلوين الارقام باللغة العربية طرق تعليم الأطفال بالألوان", prepared by Omnia Mohamed , Fatma Elbashar, Mohamed Abdelwahab, *Yahia Elbashar,* دار الربيع دار الربيع للنشر والتوزيع, 2026/7971 , ISBN: 978-977-95-6455-5, [Arabic language]

7- " مدخل لمبادئ وطرق التدريس الجامعي طرق تدريس العلوم عامة والفيزياء خاصة طريقة فاينمان وتقنية الطماطم", prepared by Omnia Mohamed , Fatma Elbashar, Mohamed Abdelwahab, *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع,10553/2025 ,ISBN: 978-977-95-2755-0 [Arabic language]

8- "التعليم البنكي و التعليم الحواري", prepared by Omnia Mohamed , Fatma Elbashar, Mohamed Abdelwahab, *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع, 2024/13155, ISBN: 978-977-94-9582-8 [Arabic language]

9- "مدخل لإدارة المعرفة", prepared by Omnia Mohamed , Fatma Elbashar, Mohamed Abdelwahab, *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر

والتوزيع,16783/2025 ,ISBN: 978-977-95-3377-3 [Arabic language]

10- "استقلالية المتعلم من منظور البيداجوجي و الأندراجوجي و الهيوتاجوجي", prepared by Omnia Mohamed , Fatma Elbashar, Mohamed Abdelwahab, *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع,16782/2025 ,ISBN: 978-977-95-3376-6 [Arabic language]

11- "عالم السيارات للأطفال ، شعارات و سيارات من جميع أنحاء العالم", prepared by Omnia Mohamed , *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع, 2023/26753, ISBN: 978-977-7782-4 [Arabic language]

12- "أعلام و عملات الدول العربية للأطفال", prepared by Omnia Mohamed , *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع, 2023/26752, ISBN: 978-977-7781-7 [Arabic language]

13- "وظائف الفيزيائيين في مصر و العالم", الطبعة الثانية, prepared by *Yahia Elbashar,* دار الربيع دار الربيع للنشر والتوزيع, 2026/7969 , ISBN: 978-977-95-6453-1, [Arabic language]

14- "Undergraduate First Year Physics Laboratory Manual", Deiaa Moubarak and *Yahia Elbashar*, , دار الربيع للنشر والتوزيع, 2023/19466, ISBN: 978-977-94-7123-5 [English language]

15- "مبادئ ومعايير ضمان الجودة والاعتماد لمؤسسات التعليم العالي في جمهورية مصر العربية", prepared by

Omnia Mohamed , Mohamed Abdelwahab, and *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع, 2023/13175, ISBN: 978-977-94-6252-3 [Arabic language]
16- “A tutorial Guide for operating Hydroponic system using Solar Energy”, prepared by Mohamed Mostafa Bisheer and *Yahia Elbashar*, دار الربيع للنشر والتوزيع, 2023/7775, ISBN: 978-977-94-5201-2,[English language]
17- “ A Guide to Construct a Solar cell system for Hydroponic application”, prepared by Ahmed Gomaa and *Yahia Elbashar*, دار الربيع للنشر والتوزيع, 2023/7774, ISBN: 978-977-94-5200-5, [English language]
18- “العقرب بين حضارتي العراق القديم ومصر القديمة“ ‘”, prepared by Omnia Mohamed and *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع, 2023/7772, ISBN: 978-977-94- 5198-5, [Arabic language]
19- "وظائف الفيزيائيين في مصر و العالم " ,دار الربيع للنشر والتوزيع, prepared by *Yahia Hamdy* ، دارالربيع للنشر والتوزيع , 2023/3443 , ISBN: 978-977-94-4679-0 [Arabic language]
20- “ المصنوعات الزجاجية في مصر القديمة حتى نهاية العصر اليوناني الروماني”, prepared by Omnia Mohamed and *Yahia Elbashar,* دار الربيع للنشر والتوزيع, 2022/23393, ISBN:978/977-94-3934-1 ,[Arabic language]

21- “ الزجاج ودوره الحضاري عبر العصور المصرية القديمة”, prepared by Omnia Mohamed and <u>*Yahia Elbashar,*</u> دار الربيع للنشر والتوزيع, 2022/23392, ISBN:978/977-94-3933-4 ,[Arabic language]

22- Lecture Notes in Peening Techniques and its Applications, prepared by <u>*Yahia Hamdy Elbashar*</u>, دار الربيع للنشر والتوزيع, 2022/15970, ISBN:978-977-94-2721-8 [English language]

23- Lecture Notes in Glass and Glass Doped Rare Earth, prepared by Omnia Mohamed and <u>*Yahia Elbashar,*</u> دار الربيع للنشر والتوزيع, 2022/15969, ISBN:978-977-94-2720-1 [English language],

24- “ أسس و قواعد المعادلات في تبسيط علوم فيزياء الرياضيات”, Authored and Collected by Aly Saeed and <u>*Yahia Hamdy Elbashar,*</u> [Arabic language], دار الربيع للنشر والتوزيع, 2021/15092, ISBN: 978/977-90-9113-6

25- “Serpent in Ancient Mesopotamia”, Authored and Collected by Omnia Mohamed and <u>*Yahia Elbashar,*</u> [English language], دار الربيع للنشر والتوزيع, 2021/15093, ISBN: 978/977-90-9114-3

26- “موضوعات في تبسيط العلوم الفيزيائية الحديثة”, <u>*Yahia Elbashar*</u> ,[Arabic language], دار الربيع للنشر والتوزيع, 2021/15094, ISBN: 978/977-90-9115-0



أ.م.د يحيى حمدي محمد إبراهيم البشار

أستاذ الفيزياء المساعد، وعضو اللجنة الوطنية للفيزياء بأكاديمية البحث العلمي والتكنولوجيا بالقاهرة، وخبير تكنولوجيا الليزر بنقابة المهن العلمية بالقاهرة، وعضو سابق بمجلس شعبة الطبيعة والفلك لمجلس نقابة المهن العلمية بالقاهرة بجمهورية مصر العربية.

يُعدّ من الباحثين المهتمين بتبسيط العلوم ونشر الثقافة العلمية، وقد أثرى المكتبة العربية بعدد كبير من المؤلفات والدراسات التي تجاوزت ثلاثين كتابًا في مجالات الفيزياء والعلوم التطبيقية، وطرائق التدريس والتعليم الجامعي، وإدارة المعرفة، وضمان الجودة والاعتماد الأكاديمي، وريادة الأعمال، إلى جانب مؤلفات في تبسيط العلوم للأطفال، والآثار والحضارات القديمة، والطاقة الشمسية والزراعة المائية، فضلاً عن عدد من المراجع والمحاضرات العلمية باللغة الإنجليزية.

تتميَّز أعماله بالسعي إلى بناء جسور بين المعرفة العلمية والتطبيقات الحياتية، وإتاحة العلوم بأسلوب مبسط يجمع بين الدقة الأكاديمية وسهولة العرض.

